

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ

(повна назва інституту/факультету)

КОНСТРУЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ АПАРАТУРИ

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК: 003.26;

004.056.55

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 2020 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) 172 - телекомунікації та радіотехніка _____
(код і назва спеціальності)

на тему: Методи визначення координат об'єктів з використанням технології LoRa _____

Виконав (-ла): студент (-ка) 6 курсу, групи ДК-91мп
(шифр групи)

_____ Сорокін Дмитро Анатолійович _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Науковий керівник _____ доц. к.т.н. Кучернюк П. В. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) _____ (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент Нач. сектора Танигін В.Ю. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент

_____ (підпис)

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет електроніки

Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) 172 – Телекомунікації та радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ТОВ «Радіонікс»
Зав'ялов С.Б.

« 4 » вересня 20 20 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Лисенко О.М.

« ____ » _____ 20 ____ р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію**
Студенту Сорокіну Дмитру Анатолійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Методи визначення координат об'єктів з використанням технології LoRa

науковий керівник дисертації Кучернюк Павло Валентинович, к.т.н, старший викладач

затверджені наказом № 3241-с по університету від "05" листопада 2020 р.

2. Строк подання студентом дисертації 15.12.2020
3. Об'єкт дослідження системи позиціонування об'єктів на місцевості
4. Предмет дослідження метод трилатерації з використанням RSSI ранжування в мережі LoRa.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити
1. Аналіз існуючих підходів та методів геолокації
 2. Розробка алгоритмів для моделювання системи позиціонування

3. Проведення експериментів з метою дослідження ефективності запропонованих методів та алгоритмів для вирішення задачі позиціонування.
4. Створення моделі для імплементації розроблених рішень у системи позиціонування.
6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу
Презентація у форматі PowerPoint
7. Орієнтовний перелік публікацій 1 публікація
8. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


№ з/п	Назва етапів виконання Магістерської дисертації	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналіз тематичної літератури	04.01.20-01.03.20	Вик.
2	Обґрунтування вибору методу трилатерації для розв'язання задачі пеленгації	01.03.20-15.03.20	Вик.
3	Аналіз моделей втрат потужності для реалізації методу трилатерації	01.03.20-01.05.20	Вик.
4	Програмна реалізація методу та моделювання обраного рішення	01.05.20-01.08.20	Вик.
5	Експериментальна перевірка обраних методів	01.08.20-01.10.20	Вик.
6	Пошук рішень для зменшення похибки	01.10.20-01.11.20	Вик.
7	Розроблення стартап-проекту	01.11.20-15.11.20	Вик.
8	Оформлення дисертації	15.11.20-15.12.20	Вик.

Студент


(підпис)

Сорокін Д.А.

Керівник проекту


(підпис)

Кучернюк П.В.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Робота виконана на 98 сторінках, складається з 5 розділів. В них увійшло 30 ілюстрацій, 35 таблиць та 23 джерела в переліку посилань.

Актуальність. Останні 20 років ознаменувались різким ростом інтернет-технологій. Провідне місце серед них посідає Інтернет речей (Internet of Things, IoT). IoT містить мільярди взаємопов'язаних пристроїв, кількість яких збільшується кожного дня. Виробниками пропонується різноманіття приладів для забезпечення особистої безпеки, підвищення побутового комфорту або розширення комунікаційних можливостей. Однією з областей застосування технології IoT, яка досить стрімко розширюється, є відслідковування місцезнаходження об'єктів. Спектр означених технологій сягає від відображення детальної інформації про поточний стан об'єкта, його on-line розташування, побудови маршрутів руху міського транспорту, пошуку метеостанцій у важкодоступних місцях до контролю за поштовими відправленнями клієнтів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження проводилися відповідно до тематики наукових досліджень ТОВ "Радионикс"

Метою дисертаційної роботи є збільшення точності методу позиціонування об'єктів на місцевості з використанням технології LoRa за рахунок вибору оптимальної математичної моделі втрат сигналу.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися наступні задачі: проаналізовано існуючі підходи та методи геолокації; побудовано математичні моделі щодо розв'язання завдання; розроблено алгоритм трилатерації об'єктів; створено модуль прийому/передачі для експериментальної перевірки ефективності здійснених заходів; програмно реалізовано Simulink-модель для імплементації розроблених рішень у системи позиціонування; запропоновано стартап-проект.

Об'єктом дослідження є системи позиціонування об'єктів на місцевості.

Предметом дослідження є метод трилатерації з використанням RSSI ранжування.

Методи дослідження. Методи наукового пізнання (аналіз, синтез, індукція, дедукція, аналогія), порівняльний аналіз математичних моделей: Логарифмічних втрат, Окомури-Хата та модель ITU-R.

Наукова новизна. Експериментально досліджено та показано, що для вирішення задачі трилатерації модель рекомендована ITU-R найточніше враховує параметри навколишнього середовища, в порівнянні з моделями Логарифмічних втрат, Окомури-Хата. Запропоновано Simulink-модель, яка дозволяє досліджувати вплив факторів навколишнього середовища на процес моделювання втрат. Така модель може бути імплементована безпосередньо в мережу LoRa.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблено та програмно реалізовано алгоритм математичної моделі трилатерації; створено дослідний зразок прийомо-передавача технології LoRa; запропоновано методику експериментальних досліджень для моделей втрат потужності у просторі базуючись на технології LoRa; визначено рішення для зменшення похибок визначення координат об'єктів.

Апробація результатів дисертації здійснено на XX Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених «Електроніка-2020» (м. Києві 20-25 квітня 2020 року).

Публікації. «Використання технології LoRa для вирішення задачі локалізації об'єктів в IoT-системах». Сорокін Д.А. Електронна та акустична інженерія. Том 3. 2020. № 3. С. 34-39.

Ключові слова: геолокація, відслідковування об'єктів, трилатерація, RSSI, потужність сигналу.

ANNOTATION

The work is performed on 98 pages, consists of 5 sections. They include 30 illustrations, 35 tables and 23 sources in the list of references.

Topicality. The last 20 years have been marked by a sharp rise in Internet technology. The leading place among them is occupied by the Internet of Things (IoT). The IoT contains billions of interconnected devices, the number of which is increasing every day. Manufacturers offer a variety of devices to ensure personal safety, increase home comfort or expand communication capabilities. One of the applications of IoT technology, which is expanding rapidly, is the tracking of the location of objects. The range of these technologies ranges from displaying detailed information about the current state of the object, its on-line location, construction of public transport routes, search for weather stations in hard-to-reach places to control customer mail.

Connection of work with scientific programs, plans, topics. The dissertation research was conducted in accordance with the topics of scientific research of the Department of KEOA of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute. Igor Sikorsky ».

The aim of the dissertation is to increase the accuracy of the method of positioning objects on the ground using LoRa technology by choosing the optimal mathematical model.

To achieve this goal, the following tasks were solved in the work: the existing approaches and methods of geolocation are analyzed; mathematical models for solving the problem are built; an algorithm for object trilateration has been developed; the module of reception / transfer for experimental check of efficiency of the carried-out actions is created; software implemented Simulink-model for implementation of developed solutions in positioning systems; proposed startup project.

The object of research is the positioning systems of objects on the ground.

The subject of the study is the method of trilateration using RSSI ranking.

Research methods. Methods of scientific knowledge (analysis, synthesis, induction, deduction, analogy), comparative analysis of mathematical models: Logarithmic losses, Okumuri-Khata and ITU-R model.

Scientific novelty of the obtained results. It has been experimentally investigated and shown that the recommended ITU-R model for solving the trilateration problem is more efficient in comparison with the Logarithmic Loss models, Okumuri-Khata. A Simulink model is proposed, which allows to study the influence of environmental factors on the process of loss modeling. Such a model can be implemented directly into the LoRa network.

The practical significance of the results. The algorithm of the mathematical model of trilateration is developed and programmatically implemented; a prototype of the transceiver of LoRa technology was created; the technique of experimental researches for models of power losses in space based on LoRa technology is offered; identified solutions to reduce errors in determining the coordinates of objects.

The dissertation results were tested at the XX International Scientific and Technical Conference of Young Scientists "Electronics-2020" (Kyiv, April 20-25, 2020).

Publications. "Using LoRa technology to solve the problem of localization of objects in IoT-systems". Sorokin DA Electronic and acoustic engineering. Volume 3. 2020. № 3. pp. 34-39.

Keywords: geolocation, object tracking, trilateration, RSSI, signal strength.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	10
ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОЛОКАЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ LORA	15
1.1. Вибір методів дослідження.....	15
1.1.1. Теоретичні методи дослідження.....	15
1.1.2. Емпіричні методи дослідження	16
1.2. Порівняльний аналіз бездротових технологій для IoT застосувань	17
1.2.1. Локалізація з використанням LPWAN.....	18
1.2.2. Технологія LoRa.....	20
1.2.3. LoRaWAN протокол	22
1.3. Аналіз методів локалізації	24
1.3.1. Триангуляція.....	24
1.3.2. RSSI ранжування як метод трилатерації	25
1.3.3. TDoA як метод мультиратирації.....	26
1.4. Картографічні проекції.....	28
1.4.1. Визначення системи координат ECEF	28
1.4.2. Метод ортономи для визначення відстані	29
1.5. Патентний пошук.....	31
Висновки до розділу	34
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ МЕТОДІВ ДЛЯ СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ	36
2.1. Моделювання теоретичних втрат на трасі	36
2.2. Математична модель трилатерації.....	40
Висновки до розділу	43

РОЗДІЛ 3	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА МЕТОДІВ ТА МОДЕЛЕЙ	45
3.1.	Проектування пристрою прийому – передачі.....	45
3.2.	Вимірювання опорних значень потужності.....	48
3.3.	Вимірювання потужності при змінній відстані.....	52
3.4.	Проведення експерименту для системи приймачів	55
Висновки до розділу		59
РОЗДІЛ 4	МОДИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ	60
4.1.	Виявлення причин похибки.....	60
4.2.	Способи зменшення похибки	63
4.3.	Simulink-модель системи позиціонування	66
Висновки до розділу		68
РОЗДІЛ 5	РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ В СТАРТАП- ПРОЕКТІ	70
5.1.	Зміст ідеї.....	70
5.2.	Аудит.....	71
5.3.	Аналіз ринкового середовища.....	74
5.4.	Аналіз стратегій розвитку	79
5.5.	Області застосування результатів та очікуваний ефект	83
Висновки до розділу		83
ВИСНОВКИ		85
Список літератури		87
ДОДАТОК А.	Матеріали публікацій.....	90
ДОДАТОК Б.	Акт впровадження.....	96

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

IoT - Internet of Things

LoRa - Long Range

GPS - Global Positioning System

RSSI - Received Signal Strength Indication

TDoA - time difference of arrival

LPWAN - Low-power Wide-area Network

PHY - Physical layer

CSS - Chirp Spread Spectrum

SF - Spreading Factor

ADR - Adaptive Data Rate

SNR - signal-to-noise ratio

AOA - Accurate angle of arrival

ToA - Time of arrival

ECEF - earth-centered, earth-fixed

SPI - Serial Peripheral Interface

ВСТУП

Останні 20 років ознаменувались різким ростом інтернет-технологій. Провідне місце серед них посідає Інтернет речей (Internet of Things, IoT). IoT містить мільярди взаємопов'язаних пристроїв, кількість яких збільшується кожного дня. Виробниками пропонується різноманіття приладів для забезпечення особистої безпеки, підвищення побутового комфорту або розширення комунікаційних можливостей.

Однією з областей застосування технології IoT, яка досить стрімко розширюється, є відслідковування місцезнаходження об'єктів. Для практичної реалізації технології IoT завжди необхідна відповідна телекомунікаційна інфраструктура. Найбільш поширеними технологіями для передачі даних між IoT - пристроями є GPS, Wi-Fi, Bluetooth. Однак для вирішення задачі локалізації об'єктів використання наведених технологій не завжди є ефективним. Досить швидкими темпами розвивається і застосовується в IoT-системах нова телекомунікаційна технологія LoRa. Метою роботи є дослідження можливості застосування даної технології для вирішення задачі локалізації об'єктів.

Така технологія дозволяє виконувати комунікацію на великій відстані, характеризується низьким енергоспоживанням та високою стійкістю до завад. Найбільш оптимальним методом локалізації в таких IoT - системах, можна вважати метод трилатерації через RSSI, який дозволяє визначити місцезнаходження лише за рахунок зв'язку з передавачем, що позбавляє необхідності в забезпеченні синхронізації кінцевих пристроїв мережі, обмежуючись проведенням цієї апаратно- та енерговитратної процедури лише для LoRa-шлюзів [1]. Оскільки ж кількість останніх може бути меншою від кількості кінцевих пристроїв IoT на декілька порядків, то ефективність такого рішення не викликає сумнівів.

Трилатерація базується на потужності сигналу, який йде від передавача приймачу. Втрати потужності описуються математичними моделями, які характеризуються середовищем розповсюдження сигналу. До них можна віднести

модель логарифмічної відстані, Окумури-Хата, ITU-R. Сутність роботи полягає в аналізі таких моделей та їх адаптації для методу трилатерації, який вирішує задачу геолокації в мережі LoRa.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження проводилися відповідно до тематики наукових досліджень ТОВ "Радионикс".

Метою дисертаційної роботи є збільшення точності методу позиціонування об'єктів на місцевості з використанням технології LoRa за рахунок вибору оптимальної математичної моделі втрат сигналу.

Досягнення мети передбачає розв'язок наступних задач:

1. Аналіз існуючих підходів та методів геолокації;
2. Розробка алгоритмів для моделювання системи позиціонування;
3. Проведення експериментів з метою дослідження ефективності запропонованих методів та алгоритмів для вирішення задачі позиціонування;
4. Створення моделі для імпліmentaції розроблених рішень у системи позиціонування.
5. Розробка стартап проекту для втілення розроблених рішень.

Об'єкт дослідження – системи позиціонування об'єктів на місцевості.

Предмет дослідження – метод трилатерації з використанням RSSI ранжування в мережі LoRa.

Методи дослідження. Методи наукового пізнання (аналіз, синтез, індукція, дедукція, аналогія), порівняльний аналіз математичних моделей: Логарифмічних втрат, Окумури-Хата та модель ITU-R.

Наукова новизна дисертаційного дослідження полягає у наступному:

1. Експериментально досліджено та показано, що для вирішення задачі трилатерації модель рекомендована ITU-R найточніше враховує параметри

навколишнього середовища, в порівнянні з моделями Логарифмічних втрат, Окомури-Хата.

2. Запропоновано Simulink-модель, яка дозволяє досліджувати вплив факторів навколишнього середовища на процес моделювання втрат. Така модель може бути імплементована безпосередньо в мережу LoRa.

Практичне значення одержаних результатів полягає у наступному:

1. Розроблено та програмно реалізовано алгоритм математичної моделі трилатерації.
2. Розроблено та реалізовано дослідний зразок прийомо-передавача технології LoRa.
3. Запропоновано методику експериментальних досліджень для моделей втрат потужності у просторі базуючись на технології LoRa. Запропоновано рішення для зменшення похибок визначення координат об'єктів.

Реалізація матеріалів роботи. Наукові та практичні результати дисертаційної роботи апробовані на XX міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених «Електроніка-2020» (м. Києві 20-25 квітня 2020 року).

Публікації. «Використання технології LoRa для вирішення задачі локалізації об'єктів в IoT-системах». Сорокін Д.А. Електронна та акустична інженерія. Том 3. 2020. № 3. С. 34-39.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів основної частини, висновків, списку використаних літературних джерел та додатків.

У першому розділі здійснено огляд та вибір методів дослідження. Розглянуто архітектуру мережі LoRa, та методи геолокації, які можна використовувати на її основі. На основі порівняльного аналізу обрано метод трилатерації. Також розглянуто способи картографічної проекції для переходу від геостационарної системи координат до декартової.

У другому розділі розглянуто моделі втрат потужності у просторі, на які спирається метод трилатерації. В середовищі Matlab виконано моделювання для моделі логарифмічних втрат, Окумури-Хата, ITU-R. Проведено огляд математичної реалізації методу трилатерації.

У третьому розділі розроблено та реалізовано дослідний зразок пристрою прийому/передавачі технології LoRa. З його допомогою здійснено серію експериментів для перевірки методу трилатерації, а також визначено оптимальну модель втрат потужності у просторі.

У четвертому розділі розглянуто способи зменшення похибки при проведенні вимірювань та запропоновано Simulink-модель. Вона дозволяє проводити аналіз даних отриманих при вимірювання на місцевості та на їх основі визначати значення відстані для розв'язання задачі трилатерації.

У п'ятому розділі виконано розробку стартап проекту як можливість практичної реалізації розглянутих рішень.

Загальний об'єм дисертації складає 92 сторінок, 28 рисунки, 35 таблиці, список використаних літературних джерел, що містить 22 найменувань, та додатки.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОЛОКАЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ LORA

В даному розділі розглядаються теоретичні та емпіричні методи дослідження, підходи для визначення місцезнаходження, сформульовані основні проблеми та задачі, що впливають на якість та точність цього процесу. Розглянуті та класифіковані методи геолокації, а також проаналізовано їх особливості.

1.1. Вибір методів дослідження

1.1.1. Теоретичні методи дослідження

Наукові дослідження спираються на методи пізнання. До них входять наступні методи: аналіз; індукція; аналогія; дедукція; синтез; моделювання

Аналіз (грец. analysis – розкладення) – метод дослідження, який полягає в аналізі окремих складових частин суб’єкта дослідження. Аналітичний метод – інструмент пильного дослідження особливостей і специфіки внутрішньо-системної взаємодії, і він неодмінно містить у собі результати абстрагування, спрощення, формалізації.

Синтез (грец. synthesis – з’єднання) – як метод протипоставлений аналізу. Оскільки головною його суттю є об’єднання елементів складного явища. В цьому методі ми спираємось на вже отриманні знання та досвід для продукування нових навичок.

Індукція (лат. inductio – наведення) – метод пізнання який базується на переході від знань про окремі факти до знання загального. Його варто застосовувати при проведенні досліджень та експериментів в результаті яких створюється набір фактів.

Дедукція (лат. deductio – виведення) – метод пізнання, який протипоставлений індукції. Тому що його сутність полягає у переході від знань загальних до окремих проявів. Метод дедукції ґрунтується на загальному судженні.

Аналогія (грец. analodgia – відповідність) – метод, який передбачає порівняння двох або більше явищ з метою вивчення суттєвих рис одного на прикладі інших. Завдяки цьому можна дослідити маловідомі об’єкти.

Моделювання (лат. modulus – міра, взірець) – це метод наукового пізнання, який базується на створенні моделі для об’єкту, що вивчається. Ця модель дозволяє уточнити поведінку об’єкта досліджень більш детально. При чому одна з основних вимог, які виноситься до моделі, це ідентичність суттєвих рис оригіналу.

Для вирішення усіх задач даної роботи було вирішено використовувати наступні методи досліджень.

1. Аналіз. Дозволить визначити існуючі підходи, які застосовують в геолокації. Проаналізувати їх та виявити основні переваги та недоліки які будуть використовуватись у подальшому дослідженні.

2. Дедукція. Дозволить оцінити отримані властивості методів та на їх основі розробити власний метод визначення місцезнаходження, який покращить попередні.

3. Моделювання. За допомогою спеціального середовища, наприклад MATLAB, дозволить створити модель об’єкту дослідження та перевірити характеристики його роботи.

1.1.2. Емпіричні методи дослідження

На емпіричному рівні дослідний об’єкт відображається здебільшого з позицій зовнішніх зв’язків і відносин. Емпіричному пізнанню притаманні збір фактів, первинне узагальнення, опис дослідних даних, систематизація і класифікація. Емпіричне дослідження спрямоване безпосередньо на об’єкт дослідження, відбувається на основі методів порівняння, виміру, спостерегання, експерименту, аналізу та ін.

Спостереження – метод пізнання дійсності, який ґрунтується на безпосередньому сприйнятті процесів, явищ, об’єктів за допомогою органів чуття,

без втручання в їх буття дослідника. Спостереження використовується, як правило, там, де втручання в досліджуваний процес небажано або неможливо.

Вимірювання – це процедура приписування властивостям явища чи процесу певних значень. Цінність цієї процедури полягає в тому, що вона дає точні, кількісно визначені відомості про об'єкт.

Порівняння – це процес зіставлення предметів або явищ дійсності з метою установлення подібності чи відмінності між ними, а також знаходження загального, притаманного, що може бути властивим двом або кільком об'єктам дослідження.

Узагальнення – логічний процес переходу від одиничного до загального чи від менш загального до більш загального знання, а також продукт розумової діяльності, форма відображення загальних ознак і якостей об'єктивних явищ.

Експеримент – це система операцій, впливу або спостережень, спрямованих на одержання інформації про об'єкт при дослідницьких випробуваннях, які можуть проводитись в природних і штучних умовах при зміні характеру проходження процесу. Експеримент проводять на заключному етапі дослідження і він є критерієм істини теорії і гіпотез.

Для вирішення усіх задач даної роботи було вирішено використовувати наступні методи досліджень: вимірювання, порівняння, експеримент

1.2. Порівняльний аналіз бездротових технологій для IoT застосувань

Інтернет речей (Internet of Things, IoT) – це концепція мережі, що складається із взаємозв'язаних фізичних пристроїв, які мають вбудовані передавачі, а також програмне забезпечення, що дозволяє здійснювати передачу і обмін даними між фізичним світом і комп'ютерними системами за допомогою стандартних протоколів зв'язку [2].

Основними вимогами ефективної роботи IoT є низька вартість, значний радіус дії і ефективність використання енергії. Найбільш поширеними технологіями для передачі даних між IoT-пристроями є GPS, Wi-Fi, Bluetooth. GPS може бути корисною для локалізації у віддалених районах, де супутники ведуть передачу даних безпосередньо з пристроєм, що дозволяє уникнути необхідності в спеціальній інфраструктурі. Такий пристрій потребуватиме додатковий модуль для зв'язку, що збільшує вартість. Цих недоліків позбавлені технології Wi-Fi і Bluetooth, які також можна застосовувати для локалізації в певних умовах. Вони використовуються для локалізації на меншій площі, так як діапазон роботи Wi-Fi, як правило до 100 м, а Bluetooth навіть менше [3]. Тому, щоб охопити більшу область, необхідна щільна мережа точок доступу для цих технологій, що значно збільшує вартість розгортання.

Перераховані недоліки змушують відмовитись від використання систем бездротового зв'язку і локальних рішень, таких як Wi-Fi, GPS і Bluetooth, тому що вони не є представниками як малопотужних (Low Power) так і широко діючих (Wide Area) мереж (Networks) (LPWAN). Найбільш виправданою технологією, яка одночасно дозволяє виконувати комунікацію на великій відстані і є економічно привабливою виступає LoRa, яка є представником LPWAN мереж [1].

Перевагами LoRa в порівнянні з іншими технологіями є споживана потужність, вартість і діапазон роботи. LoRa має низьке енергоспоживання, велику дальність дії, технологію бездротового зв'язку, яка є дешевою в реалізації [1]. Завдяки цим корисним властивостям LoRa набула популярності в світі IoT [4]. Тому використовувати пристрої з сигналами LoRa для локалізації є економічно доцільним рішенням.

1.2.1. Локалізація з використанням LPWAN

При виборі методів для локалізації пристроїв IoT з точки зору точності найкращим рішенням є GPS. Для більшості сучасних глобальних систем

позиціонування (Global Positioning System) модулі дозволяють визначити місцезнаходження з точністю до 10 м у відкритому зовнішньому середовищі. Деякі навіть досягають точності сантиметрового рівня [5]. Виходячи з цього, а також з широти розповсюдження GPS, це може бути досить привабливим рішенням для локалізації IoT. Проте GPS має вагомий недолік – це висока споживана потужність: використання GPS для локалізації потребує енергії більш ніж в 10 разів, в порівнянні з LoRa. При цьому пакети даних надсилаються з тією ж швидкістю. Різниця може бути навіть до 20 разів, якщо LoRa налаштована для роботи в режимі економії енергії [6]. Більш того, до модуля GPS необхідний додатковий модуль для зв'язку. Тому, було б більш раціонально використовувати мережу LPWAN як для спілкування так і для локалізації.

Дві технології, які можуть бути використані в LPWAN є LoRa і один з її конкурентів Sigfox. Sigfox, як і LoRa, розроблений для пристроїв IoT. Для того, щоб поліпшити свої результати, Sigfox використовують методи машинного навчання. Незважаючи на зусилля, вони спроможні визначити місцезнаходження пристрою з точністю між 1-10 км до 80% випадків для статичних приладів, що є їх основним недоліком. Для більш високої точності (<500 м), вони використовують інформацію з довколишніх джерел Wi-Fi. Цей процес потребує модуля Wi-Fi в доповненні до використання Sigfox, що протирічить методам на основі LPWAN для спілкування та локалізації.

Результати Sigfox були покращені декількома іншими дослідниками за допомогою машинного навчання [7]. В даній роботі, точність позиції сягає <50 м та досягається при 100% їх випадків, хоча ця цифра може ввести в оману. У своєму алгоритмі вони вже знають місце розташування пристрою в межах радіусу 200 м. Тому залишається тільки враховувати цю невелику площу при виконанні локалізації з використанням Sigfox. Окрім цього зазначається, що діапазон роботи Sigfox може бути збільшений до 40 км [7]. Але на такій відстані виникають ускладнення через значний радіус зв'язку. Існують приклади, де LoRa

використовується для позиціонування, використовуючи RSSI [8]. Однак в цих експериментах розглядалася область тільки 64x110 м.

Sigfox і LoRa обидві здатні здійснювати зв'язок на десятки кілометрів, але локалізації виконується лише з урахуванням на невеликій площі. Тому що невелика площа спрощує обробку та збільшує точність результату. Проте в такому випадку дальнодіючі характеристики цих технологій не використовуються в повній мірі.

Безпроводний зв'язок LoRa складається з фізичного рівня та протоколу LoRaWAN. Ця технологія є запатентовано Semtech, тому кількість офіційної документації обмежена. Проте в даному розділі буде дано опис LoRa та LoRaWAN наскільки це можливо з акцентом на особливості які впливатимуть на локалізацію.

1.2.2. Технологія LoRa

LoRa – це бездротова модуляційна схема, реалізована на фізичному рівні (PHY), яка може бути використана для бездротового зв'язку на великій відстані. У даній роботі термін LoRa буде використовуватися для позначення технології в цілому. З винаходом LoRa, багато компаній почали використовувати її у своїх технологіях. Оператори зв'язку у Франції, Швейцарії та Нідерландах вже розширюють мережі LoRa, адаптуючи існуючу інфраструктуру. При аналізі цих мереж було визначено, що вони використовують метод локалізації під назвою TDoA [9]. Для систем локалізації пропонуються вже готові запатентовані рішення. Вони залишаються закритим вихідним кодом і можуть бути використані тільки як системи з чорним ящиком. Виникає проблема з індивідуальними рішеннями, які спрямовані на дослідження та потребують відкритих систем, задля розширення діапазону наукових пошуків.

LoRa модуляція побудована на Chirp Spread Spectrum (CSS) модуляції, що робить її більш стійкою до завад. CSS працює безперервно змінюючи частоту сигналу вгору або вниз (up-chirp або down-chirp). Це здійснюється за фіксованою величиною [10]. Ілюстрацію наведено на Рисунок 1.1

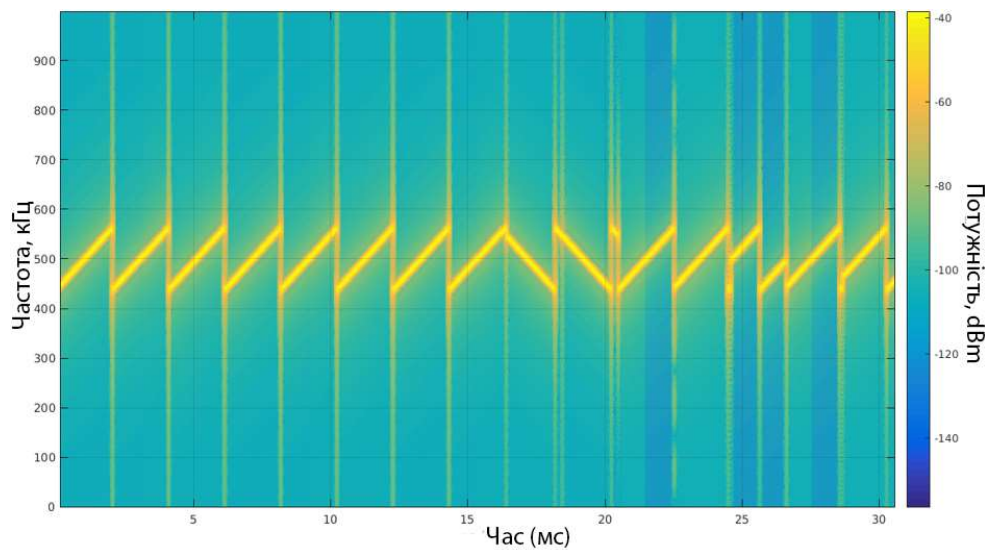


Рисунок 1.1 – Up-chirp та down-chirp в CSS модуляції

Перші 8 символів up-chirp – це символи преамбули, які використовуються для виявлення сигналу LoRa, наступні 2 символи down-chirp – це символи синхронізації, які використовуються для часової синхронізації, а потім 5 модульованих символів (корисне навантаження).

Ефект Доплера та багатопроменевої інтерференції може змінити частоту або синхронізацію сигналу. Оскільки швидкість передачі фіксується, існує прямий зв'язок між частотою і часом в CSS модуляції - корисна властивість, яку LoRa використовує, щоб зменшити вплив завад [10].

З метою підвищити стійкість сигналу до шумів і перешкод LoRa модуляція використовує різні методи [11]. Один із таких методів включає кодування символів під час модуляції LoRa. Номер біту, що використовується для кодування кожного символу один, його називають коефіцієнтом розширення SF (Spreading Factor). SF, який застосовується пристроєм LoRa, може бути будь-яким дискретним числом від 7 до 12. Більш високий SF робить сигнал стійким до шуму, що підвищує точність локалізації [11]. Це робить SF важливим параметром, який необхідно враховувати при розробці алгоритму локалізації.

При використанні SF 12, LoRa може досягти діапазону до 30 км на відкритих територіях. Може скластися враження, що завжди слід використовувати SF рівний 12. Проте, SF 12 має найнижчу швидкість передачі даних. Зменшення швидкості передачі даних означає, що пристрою потрібно буде знаходитися на відкритому просторі протягом більш тривалого часу, щоб передати таку ж кількість інформації. Це створює перешкоди для інших пристроїв, що використовують відповідну частоту, а також збільшує об'єм непотрібного трафіку для мережі. З цієї причини, оператори рекомендують використовувати адаптивну швидкість передачі даних (ADR) [12]. Коли ADR ввімкнена, пристрій буде використовувати мінімально можливий SF, при якому стабільне з'єднання може бути досягнуте [13]. Це забезпечує прийом даних мінімальною кількістю шлюзів. В результаті цього ефективність процесу локалізації зменшується. Для покращення розуміння впливу особливостей взаємодії між LoRa-пристроями на можливості рішення основної задачі, що розглядається в роботі варто розглянути протокол LoRaWAN.

1.2.3. LoRaWAN протокол

LoRaWAN – це розроблена LoRa Alliance специфікація, яка визначає архітектуру протоколу зв'язку і побудованих з його використанням мереж, що використовують технологію LoRa [10]. Протокол LoRaWAN реалізований на фізичному рівні. На Рисунок 1.2 наведено типову топологію мережі, яка використовує протокол LoRaWAN [14].



Рисунок 1.2 – Топологія мережі LoRaWAN

На рис. 2 представлені вузли (Node) які підтримують зв'язок з шлюзом (Gateway) по протоколу LoRaWAN. Їх процес взаємодії в мережі виглядає наступним чином. Вузол одночасно передає інформацію до всіх шлюзів. Інформація, яка завжди надходить з пакетом даних – це часова мітка, значення інтенсивності сигналу (RSSI) та відношення сигнал-шум (SNR). Дані записуються шлюзом та надсилаються до сервера (Network server). Коли серверу необхідно передати інформацію вузлу, то повідомлення надійде у так зване вікно прийому. Це залежить від режиму роботи LoRa, яких існує три варіанти: A, B та C. Вони визначені протоколом LoRaWAN. Основним для розгляду є режим A, оскільки його покладено в основу роботи двох інших. Також він характеризується енергоефективним режимом роботи, який досягається за рахунок обмеженої передачі даних. Вузол відкриває вікно для прийому даних лише після надсилання пакету серверу. Після отримання відповіді від серверу вікно закривається і для відправлення наступного повідомлення в вузол необхідно дочекатись, поки вузол надішле дані. Проте використання найбільш енергоефективних алгоритмів призводить до інших проблем. Наприклад, при використанні алгоритму локалізації при недостатній кількості даних сервер не може запросити повторну передачу для якісної обробки даних. В свою чергу методи побудовані на часовій синхронізації потребують безперервного обміну даними, тому налаштування режиму A унеможливорює їх використання. Щоб краще розуміти вимоги до роботи пристрою варто розглянути основні методи визначення геолокації.

1.3. Аналіз методів локалізації

Розглянемо особливості основних методів локалізації з урахуванням специфіки роботи мережі LoRaWAN. Це дозволить обрати оптимальні методи для ефективного визначення місцезнаходження. Для того, щоб визначити місцезнаходження пристрою, спочатку потрібні кілька точок відліку місцезнаходження - їх називають точки прив'язки. Існує три відомих методи для визначення місцеположення: методи триангуляції, трилатерації і мультилатерації [15].

1.3.1. Триангуляція

В триангуляції, місце розташування пристрою може бути оцінене з використанням геометрії трикутника, який утворений між двома опорними точками і пристроєм [15]. Геометрія трикутника може бути обчислена з використанням кута надходження сигналу (АОА) від точок прив'язки до пристрою, або навпаки. В нашому випадку передавачі або пристрій можуть знаходитися на великій відстані один від одного, бо така специфіка LoRa. Через це різко збільшується похибка визначення місцезнаходження.

Метод трилатерації вже використовувався в дослідженнях по локалізації для пристроїв LoRa. Відстань від пристрою може бути оцінена двома способами: за допомогою вимірювань часу прибуття ToA (Time of arrival), або в межах RSSI (Received Signal Strength Indication) шляхом визначення потужності сигналу, що надійшов до приймача [16].

У способі ToA, основними даними для обробки слугує час, за який сигнал надходить від пристрою до станції. Через це виникає необхідність у синхронізації пристроїв та наявності точних годинників. Синхронізація потребує збільшення енергоспоживання та об'єму трафіку, що не узгоджується з довготривалою роботою від акумуляторних джерел живлення. Тому ToA не розглядатиметься далі

як метод локалізації. Проте варто звернути увагу на використання RSSI для трилатерації в мережах LoRa.

1.3.2. RSSI ранжування як метод трилатерації

Основний принцип, що застосовується в способі RSSI для ранжирування, є використання потужності сигналу, яка втрачається між передатчиком та приймачем. Потужність сигналу, яка втрачається через середовище передачі відома як втрати на трасі [9]. Втрату на трасі можна визначити за так званим бюджетом посилки. Він розраховується як підсумок всіх отриманих та втрачених сигналів, які надійшли від передавача до приймача через усі середовища передачі. Це можна описати простим рівнянням [10]:

$$P_{R_x} = P_{T_x} + G_{R_x} + G_{T_x} - L_{PL} \quad 1.1$$

де P_{R_x} – це потужність сигналу в приймачі в дБ (відповідає RSSI), P_{T_x} – потужність сигналу в передавачі, G_{R_x} і G_{T_x} – є коефіцієнти посилення антен, які використовуються приймачем і передавачем відповідно, L_{PL} – складова, яка враховуватиме втрати сигналу.

Знаючи втрати сигналу, можна розрахувати відстань, яку пройшов сигнал. Відстань в нашому випадку є опорною величиною для виконання трилатерації та визначення координат.

Як уже згадувалося, є третій поширений метод локалізації, який називається мультилатерація [15]. Цей метод не вимагає визначення відстані від пристрою до кожної точки прив'язки, а скоріше, тільки відмінність в відстані між точками прив'язки та пристроєм. Різницю у відстанях можна розрахувати як різницю в часі прибуття TDoA (Time Difference Of Arrival) сигналу від пристрою до контрольних точок або навпаки.

1.3.3. TDoA як метод мультиратирації

TDoA є популярним методом для локалізації, оскільки він не вимагає синхронізації передавача з приймачами, а потребує тільки відмінності між відмітками часу передачі. Такі мітки часу визначаються на кожному шлюзі при прийомі-передачі. Оскільки TDoA не вимагає безпосередньої інформації про час від пристрою, синхронізованими між собою мають бути лише приймачі.

Будемо вважати, що, коли сигнал LoRa передається від пристрою, він буде отриманий N шлюзами. Ці шлюзи будуть нашими опорними точками, тому що нам відомо їх розташування. Оскільки вони різновіддалені від пристрою, то приймають передачу від LoRa в різні моменти часу.

Теоретично, використовуючи відмінності у часових інтервалах від усіх можливих пар шлюзів, ми можемо обчислити положення передавача, якщо сигнал був отриманий, щонайменше, трьома шлюзами. Цю відстань можна обчислити за формулою [10]:

$$\Delta d_{i,j} = C * \Delta t_{i,j} \quad 1.2$$

де C – швидкість світла в повітрі; i та j – відповідні LoRa шлюзи.

Використовуючи вимірювання TDoA, ми можемо створити гіперболу, що складається з усіх можливих точок, де пристрій може знаходитись Рисунок 1.3 [8].

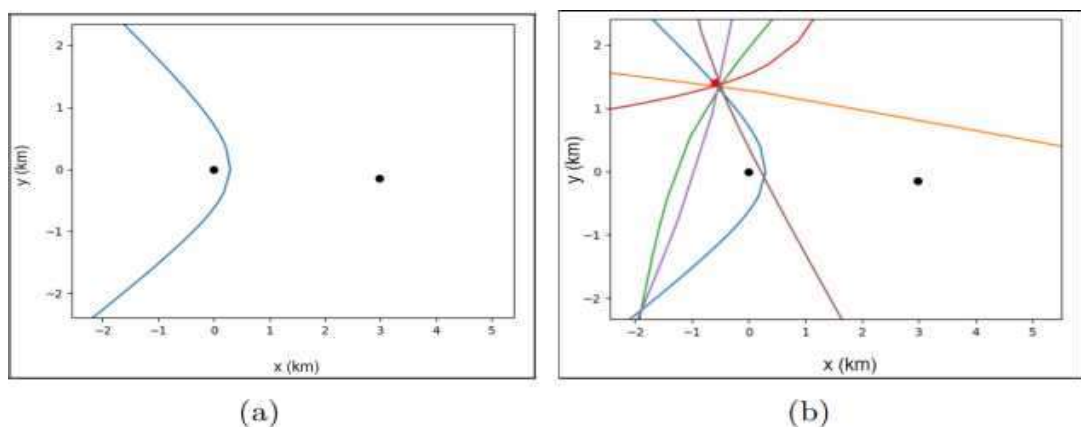


Рисунок 1.3 – Визначення місцезнаходження у методі TDoA

На Рисунок 1.3(а) чорні точки представляють LoRa шлюзи, а червона точка є пристрій в глобальній системі координат. З правого боку відображено результат вимірювання TDoA з інших пар шлюзів. Вони генерують більше гіпербол. Як ми можемо бачити на Рисунок 1.3(б), існує єдина точка, де все гіперболи перетинаються одна з одною та вказують на фактичне місцезнаходження пристрою. Цей приклад TDoA описує ідеальну ситуацію, але в дійсності виникає помилка від невизначеності вимірювань TDoA [17].

Порівняння розглянутих методів наведені у Таблиця 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика методів

Метод	Переваги	Недоліки
Тріангуляції	Простота у обрахуванні	Невисока точність на великих відстанях
Трилатерації	Висока точність позиціонування	Велике енергоспоживання через потребу у синхронізації
Мультилатерації на основі RSSI ранжування	Низьке енергоспоживання Простота реалізації	Середня точність
Мультилатерації на основі TDoA	Висока точність Низьке енергоспоживання	Складність обрахунку

Враховуючи розглянуті вище особливості методів визначення місцеположення об'єктів, для IoT - систем, побудованих з використанням технології LoRa, найбільш оптимальним методом локалізації, можна вважати метод мультилатерації на основі RSSI ранжування, який дозволяє визначити місцезнаходження лише за рахунок зв'язку з передавачем, без необхідності використовувати додаткові системи.

1.4. Картографічні проекції

1.4.1. Визначення системи координат ECEF

Позиціонування виконується на поверхні Землі, відповідно координати об'єкта визначені значеннями довготи та широти. При виконанні обрахунку буде використана декартова система координат. Щоб перехід між системами було виконано коректно, буде використано система ECEF Рисунок 1.4. Вона представляє позиції як координати X, Y і Z. Точка (0, 0, 0) визначається як центр мас від Землі, звідси термін геоцентричних координат. Відстань від заданої точки до центру Землі називається геоцентричним радіусом або геоцентричним відстанню.

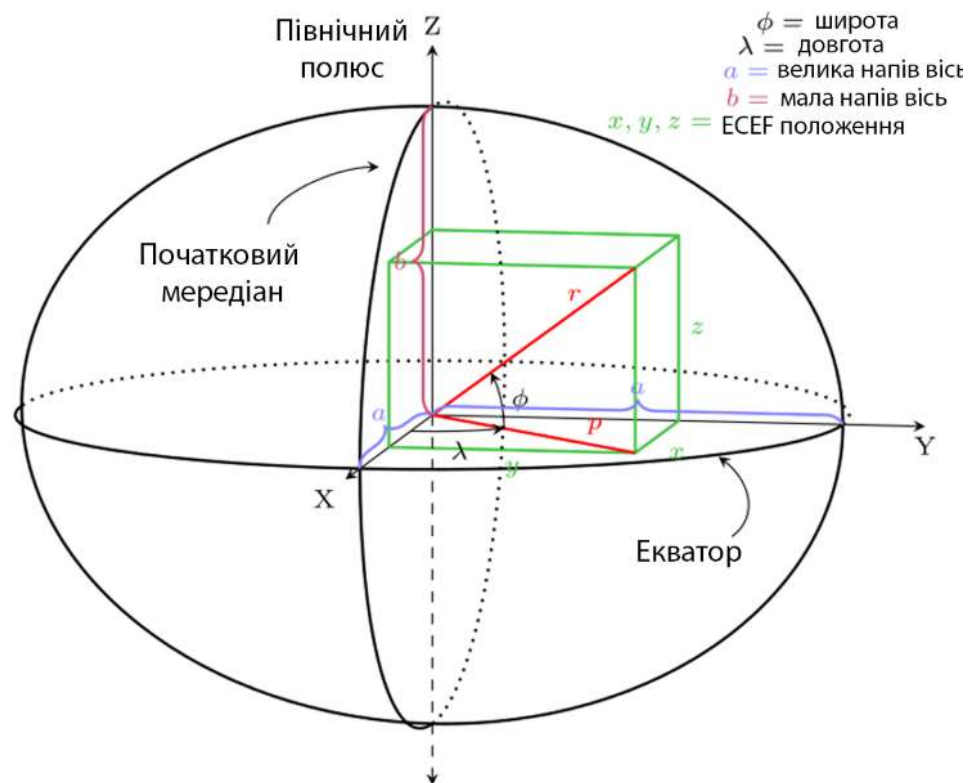


Рисунок 1.4 – Координати ECEF відносно довготи та широти

Для виконання перетворення використовується наступна система рівнянь.

$$X=R*\cos A*\cos B$$

$$Y=R*\cos A*\sin B$$

1.3

$$Z=R*\sin A$$

Де R – радіус Земної кулі, A- довгота, B – широта.

1.4.2. Метод ортономи для визначення відстані

Вирішення задачі позиціонування відбувається на місцевості, яка не може бути представлення площиною із-за форми Землі, оскільки вона представляє з себе еліпсоїд. Проблема полягатиме в тому, що при спробі визначити відстань між координатами на площині такого еліпсоїду буде утворюватися похибка. Для її зменшення використовують методи проєкції, вони дозволяють зберегти обрані географічні властивості через деформацію. Приклад зображено на рисунку Рисунок 1.5

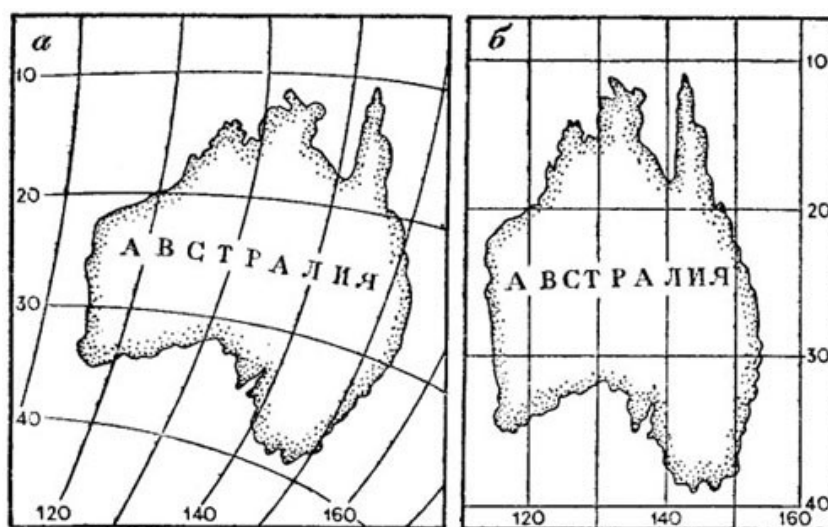


Рисунок 1.5 – Проекція Автралії на мапі півкулі (А), проекція Австралії на циліндричній мапі (Б).

Проекція А дозволяє зберегти площу та зберігає відстань вздовж лінії широти. Проте вона спотворює лінію довготи. Циліндрична проекція в свою чергу не спотворює осі, оскільки вони залишаються паралельними. В даній роботі буде

розглядатись саме таке представлення, оскільки воно не потребує компенсування кривих в осях при відображенні географічних позицій або кресленні гіпербол.

Широко розповсюдженим представником такої проекції є проекція Меркатора. Вона розтягує лінії широти щоб зберегти довжину та лінії довготи, щоб зберегти кут для навігації. Проте спотворення, які вносить такий підхід, значно ускладнюють локалізацію, оскільки обрахування формул потребує високою розрахункової здатності. Набагато простішим є метод представлення мапи за допомогою Гномонічна проекції.

Для кількісної оцінки похибки місцезнаходження в наших алгоритмах ми можемо вирахувати відстань між нашим оціненим значенням та фактичним місцезнаходженням пристрою. При роботі на площині найпростіше це виконати за допомогою Піфагорової довжини. Тим не менше проекція карти може привнести похибку, яку необхідно оцінити, щоб гарантувати точність у дозволених межах.

Техніка, яка використовується в геодезії для визначення відстані між двома об'єктами на географічній місцевості називається ортодроною. В цій техніці Земля представлена сферою та фіксованим радіусом для спрощення обрахунків. Хоча ми знаємо, що Земля являє собою еліпсоїд, тому таке спрощення має призвести до похибки в розрахунку відстані, але ця похибка не перевищує 0,5% від фактичної відстані. Для обрахунку великого кола буде використовуватись наступна формула:

$$\Delta d = R \cos^{-1}(\sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 (\gamma_1 - \gamma_2))$$

де Δd – відстань між двома точками на сфері, R – радіус Землі, φ_1, γ_1 та φ_2, γ_2 – відповідають значенням довготи та широти першої та другої точки відповідно. Ця формула може використовуватись для перевірки обрахованої похибки.

1.5. Патентний пошук

Необхідно провести пошук вже існуючих рішень для аналізу сучасного стану стосовно тематики розробки. Це буде виконано на основі патентного пошуку. Для пошуку обрано ДП «Укрпатент» та ФІПС «Роспатент».

Пошук буде виконуватись за наступними ключовими словами: «геолокація», «трилатерація», «LoRa».

Нажаль, пошук в базах даних «Укрпатент» не дав жодних результатів стосовно обраної тематики, які можна використати для аналізу існуючих рішень. За результатами пошуку «Роспатент» отримано наступні патенти:

1. RU 2 571 825 C2 «СПОСОБ И СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ УТОЧНЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ О МЕСТОПОЛОЖЕНИИ ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ»

З опису патентного рішення можна зробити наступний висновок про призначення запропонованої системи. Система розроблена для визначення положення мобільних пристроїв за рахунок використання методів гібридної латерації або трилатерації.

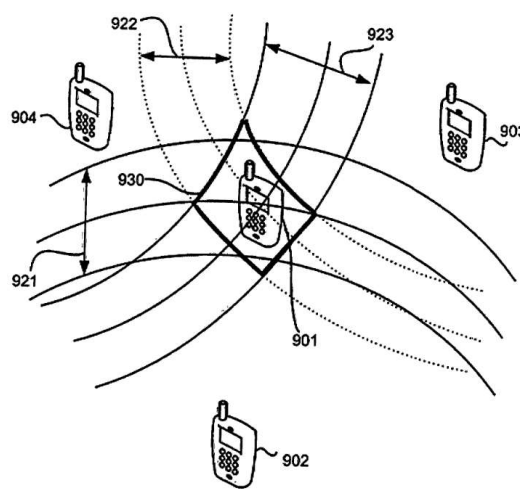


Рисунок 1.6 – Виконання гібридної трилатерації

Обрахунок для визначення місцезнаходження виконується з використанням власних ресурсів мобільного пристрою або з підтримкою мережевих компонентів таких як GPS. Окрім цього запропонована система спирається на інформацію від датчиків для уточнення інформації.

Для роботи системи запропоновано використання наступних мереж: LTE, CDMA2000/EVDO, WCDMA/HSPA, IS-136, GSM, WiMax, WiFi, AMPS, DECT, TD-SCDMA.

Рис 1.6 ілюструє варіант здійснення способу гібридної трилатерації, при якому підтверджують або уточнюють позицію мобільного пристрою 901. Але завдяки тому, що три мобільних пристрої 902, 903 і 904 можуть визначити місце розташування мобільного пристрою 901, для кожної координатної площини можуть отримати вікно похибки (або площа похибки), які позначені посилальним номером 930. Вікно або площа похибки може являти собою комбінацію помилок вимірювання дальності від мобільних пристроїв 902, 903 і 904. Внесок у вікно або площа похибки вносять гібридні помилки вимірювання дальності, позначені посилальними знаками 921, 922 і 923, де контрольний знак 921 являє собою гібридну помилку вимірювання дальності, пов'язану з мобільним пристроєм 902, контрольний знак 922 являє собою гібридну помилку вимірювання дальності, пов'язану з мобільним пристроєм 903, а контрольний знак 923 являє собою гібридну помилку вимірювання дальності, пов'язану з мобільним пристроєм 904. Крім того, цей процес можуть здійснити за допомогою більшого чи меншого числа мобільних пристроїв, ніж використано в приведеному прикладі.

Також запропоновано спосіб обрахунку відстані із даних об рівні сигналу, приблизна модель втрат на трасі:

$$RSSI_i = a - c \log_{10}(d_i) \text{ (індикація рівня приймаемого сигналу)}$$

де:

а - рівень сигналу на відстані $d_i = 1$ метр;

б - показник втрат на трасі;

с - коефіцієнт нахилу, для вільного простору застосовують коефіцієнт, що дорівнює 20.

2. RU 2 734 099 C1 «УСТРОЙСТВО И СИСТЕМА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОБЪЕКТОВ»

З опису на даний патент важливим є аналіз складової «блок визначення місцезнаходження». Даний блок визначає координати за допомогою локальної системи позиціонування в межах які вона охоплює. На Рис. 1.7 представлена схема портативного пристрою для контролю.

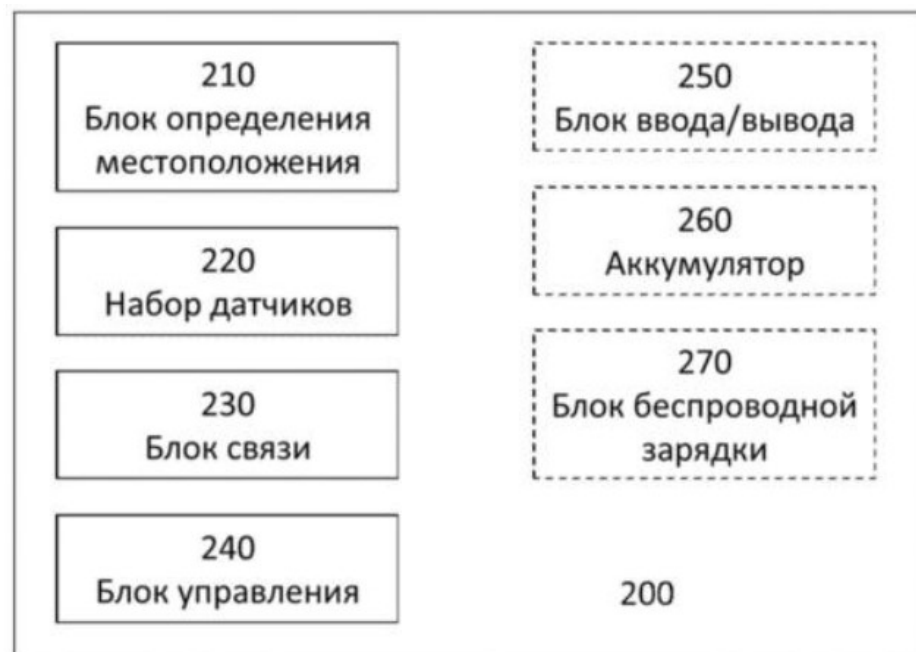


Рисунок 1.7 – Схема портативного пристрою для контролю об'єкту

Оскільки інтерес представляє в основному блок 210 розглянемо принцип його роботи детальніше.

Блок 210 визначення місця розташування призначений для визначення координат, відповідних місцю розташування даного пристрою, за допомогою локальної системи позиціонування в межах охопленої їй області. Блок 210 визначення місця розташування може містити елементи, засновані на технології

UWB (наприклад, з можливістю роботи в діапазонах 2,85 - 10,6 ГГц), RFID, Bluetooth і / або радіочастотної зв'язку, включаючи або не включаючи LoRa-модуляцію, і відповідно, функціонуючі на методах: ToA (часу прибуття сигналу), TDoA (різниці в часі прибуття сигналу), TWR (двонаправленого вимірювання відстані), RSSI (індикатора інтенсивності сигналу), відповідно до того, на яких технологіях заснована локальна система позиціонування. Поєднання декількох таких технологій в одній системі дозволяє отримати високу точності (до 1 м і менше) і надійності визначення місця розташування і збереженні відносно невеликою складності.

Висновки до розділу

Проведений аналіз показує, що задачу локалізації об'єктів можна вирішити, спираючись на сучасні алгоритми бездротової локалізації з використанням технології LoRa, яка дозволяє виконувати комунікацію на великій відстані, характеризується низьким енергоспоживанням та високою стійкістю до завад. Найбільш оптимальним методом локалізації в таких IoT - системах, можна вважати метод трилатерації через RSSI, який дозволяє визначити місцезнаходження лише за рахунок зв'язку з передавачем, що позбавляє необхідності в забезпеченні синхронізації кінцевих пристроїв мережі, обмежуючись проведенням цієї апаратно- та енерговитратної процедури лише для LoRa-шлюзів. Оскільки ж кількість останніх може бути меншою від кількості кінцевих пристроїв IoT на декілька порядків, то ефективність такого рішення не викликає сумнівів.

Аналіз методів проекції показав, що використання еквідистантційно циліндричної проекції є найбільш оптимальним між точністю та простотою обчислень. Для переходу між системами координат буде використано систему ECEF, яка дозволить виконувати розрахунок для довготи та широти в декартових координатах. Відповідно до методу проекції було обрано метод ортономи для обрахунку відстані між координатами як такий, що для своєї простоти дозволяє отримати значення з точністю до 5 % що є задовільним

Для того, щоб узагальнити рішення задачі локалізації для пристроїв IoT, буде корисно створити алгоритм, що не потребує інформації від додаткових датчиків таких, як наприклад, акселерометр, оскільки такі датчики вимагають додаткового споживання енергії. Окрім цього, краще не використовувати спільну синхронізації пристрою з приймачами, бо необхідність регулярного обміну даними збільшує затрати енергії.

З аналізу патентних рішень можна зробити наступні висновки. Системи позиціонування активно використовують методи трилатерації (RSSI) та мультилатерації (ToA, TDoA), що підтверджує результати теоретичного огляду магістерського дослідження. Аналізуючи патенту 1 нами визначено недолік: використання датчиків для визначення місцезнаходження, наприклад, модуль GPS. Вирішенням такої проблеми є побудова системи визначення місцезнаходження на основі локальної мережі, наприклад LoRa, як запропоновано в патенті 2. З метою збільшення точності позиціонування таких систем варто приділити особливу увагу запропонованій моделі втрат на трасі, розглянути альтернативи та порівняти моделі між собою.

РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ МЕТОДІВ ДЛЯ СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ

В даному розділі аналізуються математичні моделі для використання обраних методів визначення втрат на трасі. Також розглядається математична модель розрахунку трилатерації. Всі обрахунки та етапи моделювання будуть виконуватись у середовищі MATLAB.

2.1. Моделювання теоретичних втрат на трасі

Після визначення RSSI з використанням виразу (1), для подальшого розрахунку відстані до джерела сигналу необхідно встановити зв'язок між втратами та відстанню на трасі. Теоретично, бездротовий сигнал використовує вільний простір, як середовище передачі. Втрати в середовищі передачі зростають пропорційно квадрату відстані, яку він проходить від точки передачі. Насправді, це не завжди так, оскільки є багато джерел електромагнітних полів, особливо в міських районах, які впливають на несучий сигнал [9]. В цьому випадку існує декілька способів для врахування впливу навколишнього середовища.

Одним з таких способів є спосіб оцінки відстані за формулою логарифмічної відстані втрат на трасі [18]:

$$L_{PL}(d) = L_{PL}(d_0) + 10 * \gamma * \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad 2.1$$

де $L_{PL}(d)$ – являє собою втрати на трасі в дБ на відстані d , $L_{PL}(d_0)$ – є втрати в тракті передачі на опорній відстані d_0 , де ще не спостерігається вплив навколишнього середовища, γ є показником втрат на трасі і X_σ – це втрата від затухання тіні з нульовим середнім гауссовим розподілом і еталоном відхилення від σ . Зазвичай d_0 прийнято брати за 1 м. [19]

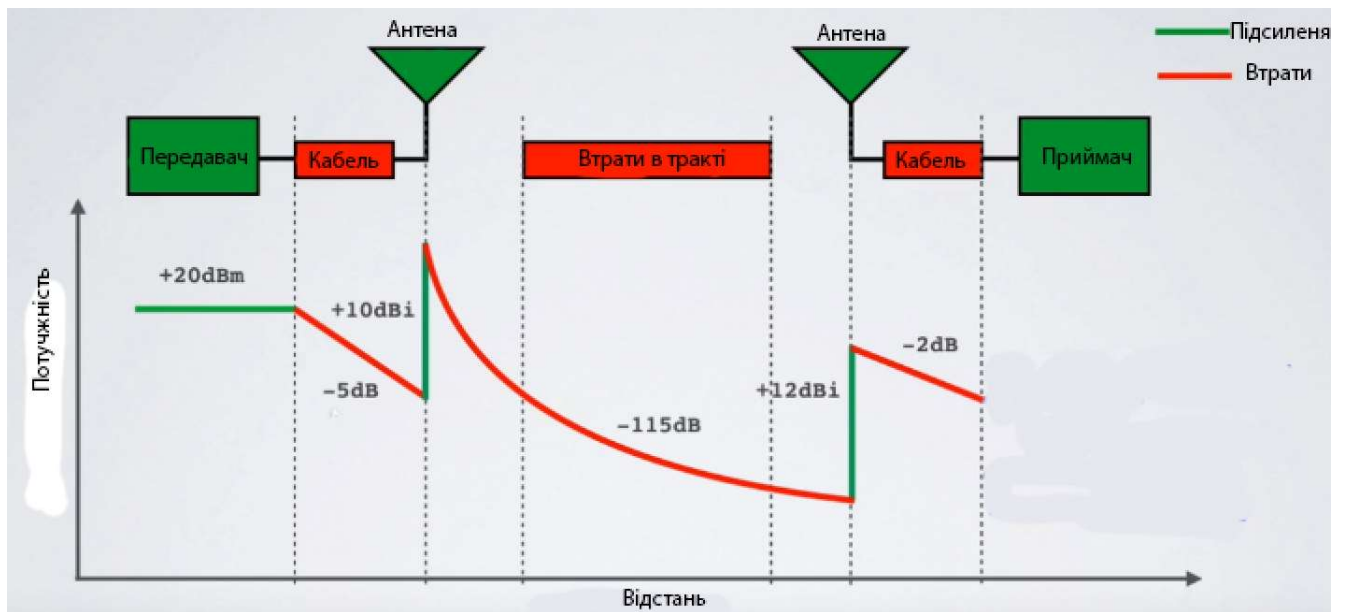


Рисунок 2.1 – Втрати сигналу в лінії передачі

На Рисунок 2.1 наведено зв'язок між середовищем передачі, та втратами сигналу [14]. З аналізу можна зробити висновок, що основні втрати відбуваються в середовищі передачі. Саме коефіцієнт γ визначає інтенсивність цих втрат. Наприклад, для міста Оулу у Фінляндії значення $\gamma = 2,32$, а для міста Дортмунд в Німеччині $-\gamma = 2,65$. Такі відмінності обумовленні зовнішніми [19] факторами та індивідуальними особливостями міського середовища. Відповідно до цього ми не можемо використовувати однакові значення для γ . Для кожного середовища необхідно проводити власні вимірювання для визначення значень цих параметрів.

Як правило, при практичному застосуванні систем локалізації об'єктів на пристроях LoRa з використанням RSSI, вони або використовували невелику площу, або працювали на відкритій місцевості з мінімальними завадами [8].

Також наявні інші способи для обрахунку втрат на трасі. Вони відрізняються між собою параметрами, які беруться до уваги при обрахунку.

Модель Окумури – Хата побудована на емпіричних даних та використовуються для діапазону частот 150 Гц – 1500 МГц. Формула для обрахунку втрат в умовах міської простору наведена нижче.

$$L_u = 69.55 + 26.16 * \log_{10} f - 13.82 * \log_{10} h_b - C_H + [44.9 - 6.55 * \log_{10} h_b] * \log_{10} d \quad 2.2$$

Де L_u = Втрати шляху в міських районах (дБ), h_b = Висота антени базової станції (м), h_M = Висота антени мобільної станції (м), f = частота передачі (МГц), C_H = коефіцієнт корекції висоти антени, d = відстань між базовою та мобільною станціями (км).

$$C_H = 0.8 + (1.1 * \log_{10} f - 0.7) * h_M - 1.56 * \log_{10} f \quad 2.3$$

Модель передбачає адаптивний розрахунок для втрат у приміській області. Для цього формула приймає вигляд 2.4.

$$L_{SU} = L_U - 2 \left(\log_{10} \frac{f}{28} \right)^2 - 5.4 \quad 2.5 \quad 2.4$$

Та варіант для втрат у просторі без завад

$$L_{SU} = L_U - 2 \left(\log_{10} \frac{f}{28} \right)^2 - 5.4 \quad 2.5$$

$$L_O = L_U - 4.78 * (\log_{10} f)^2 + 18.33 * (\log_{10} f) - 40.94 \quad 2.6$$

Сектором радіокомунікації ITU-R запропоновано свої рекомендації для обрахунку втрат на трасі.

$$L_{bf} = 32.4 + 20 * \log_{10} f + 20 * \log_{10} d \quad 2.7$$

Де f – частота (МГц), d – відстань (км).

Така різноманітність потребує моделювання процесу втрат для порівняння його з практичними даними. Попередньо необхідно визначити декілька основних параметрів для моделювання. Відстань для розрахунку втрат буде прийнята за 1 км, для точок з кроком в 0.1 м. Оскільки подальше експериментальне дослідження не передбачає роботу в області поза межами встановленого значення.

Для моделі логарифмічної відстані $L_{PL}(1) = -23$ dBm (виміряно практично, описано в п 3.1). Для моделі Окумури – Хата висоту базової станції « h_b » та висоту мобільної станції « h_M » буде прийнято за 2 м. Частота становить 433 МГц, визначена специфікацією мережі LoRa.

В середовищі MATLAB створено програму для моделювання втрат на трасі для кожного з методів у відповідності до обраних параметрів. За результатами моделювання взято вибірку з відстаней, для яких планується проведення експериментальні вимірювання.

Таблиця 2.1 – Результати моделювання

Відстань	Потужність, дБм				
	Логарифмічної відстані	Окумури – Хата			ITU-R
		Міська	Приміська	Відкрита	
1	20	6	-2	-20	25
101	60	82	74	56	105
201	66	94	86	68	117
301	70	101	93	75	124
401	72	105	97	79	129
501	74	109	101	83	133
601	76	112	104	86	136
701	77	115	107	89	139
801	78	117	109	91	141
901	79	119	111	93	143

Дані представлено графічно Рисунок 2.2.

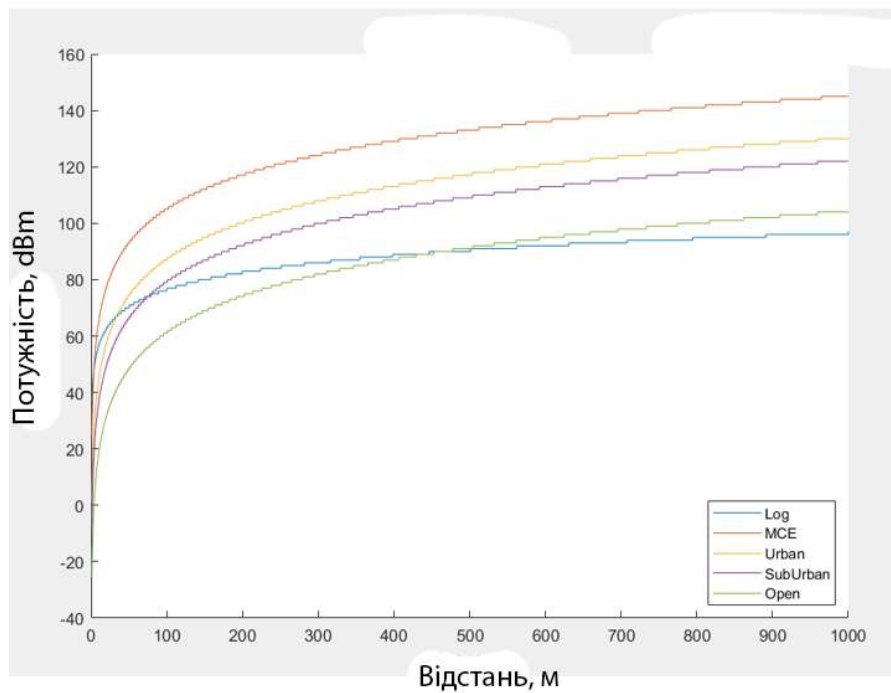


Рисунок 2.2 – Результати моделювання втрат на трасі

Результати буде використано при аналізі експериментальних даних. Модель, яка найкраще описуватиме умови навколишньої середовища, буде використана для зворотного розрахунку, тобто визначення відстані.

2.2. Математична модель трилатерації

Сутність методу трилатерації полягає у визначенні координат пунктів геодезичних мереж шляхом побудови системи трикутників та вимірювання їх сторін. Основною відмінністю від триангуляції є визначення довжин сторін побудованих трикутників, а не кутів.

В нашому випадку буде використовуватись тривимірна трилатерація, оскільки система будується на трьох опорних станціях. Щоб вирішити задачу необхідно розв'язати систему рівнянь, що задають три сфери. Для спрощення розрахунку прийнято вважати, що центри сфер знаходяться в одній площині $z=0$, один з них знаходиться на початку координат, другий – на осі x . Тобто координата

одної із станцій завжди буде координати $(0,0,0)$, друга на осі x матиме координату $(x,0,0)$, а остання знаходиться у точці $(x,y,0)$. Таке представлення зображено на Рисунок 2.3.

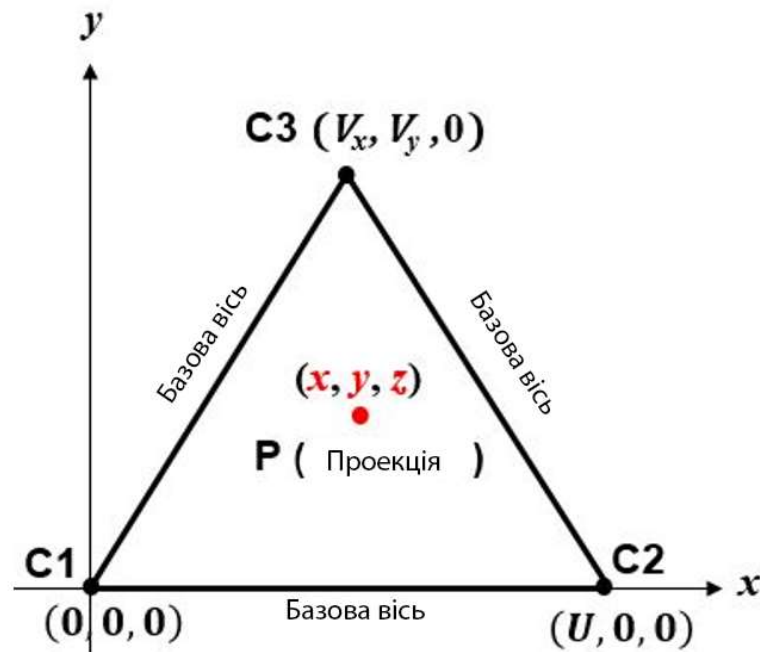


Рисунок 2.3 – Графічне зображення сфер в системі координат

В даному випадку $C1, C2, C3$ – опорні станції, P – передавач. V_x, V_y – координати по осі x, y для опорної станції $C3$, U – координата по осі x для станції $C2$. Для виконання математичних операції далі буде введено заміну $V_x - i, V_y - j, U - d$.

Рівняння трьох сфер буде мати наступний вигляд 2.8.

$$\begin{aligned} r_1^2 &= x^2 + y^2 + z^2 \\ r_2^2 &= (x - d)^2 + y^2 + z^2 \\ r_2^2 &= (x - d)^2 + (y - j)^2 + z^2 \end{aligned} \quad 2.8$$

Вирішення задачі полягає у пошуку точки з координатами (x,y,z), яка задовольняє усі три рівняння. Виконуючи перетворення можна вивести обернене рівняння для обрахунку кожної координати 2.9.

$$\begin{aligned}x &= \frac{r_1^2 - r_2^2 + d}{2*d} \\y &= \frac{r_1^2 - r_3^2 + i^2 + j^2}{2*j} - \frac{i}{j} x \\z &= \pm \sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2}\end{aligned} \quad 2.9$$

Вирішення рівнянь дозволить отримати координати передавача.

Обрахунок буде виконуватись для визначених початкових умов. В системі відомі розміщення базових станцій, тобто координати їх центрів сфер. Також відома відстань від кожної станції до передавача, вона буде визначення в процесі практичних вимірів, які описані в п. 3.4. Цієї інформації достатньо для визначення координат передавача, використовуючи метод трилатерації.

Алгоритм розрахунку буде наступним:

Як зазначено в п. 2.1 для математичного обрахунку координат необхідно перевести їх із системи геодезичних координат у декартову систему координат. Отже, першим етапом буде перетворення координат у обрану систему ECEF.

Для переведених координат побудуємо матрицю, яка буде характеризувати опорні станції як центри трьох сфер.

Тепер необхідно перейти до системи координат, правильно розмістивши центри кіл, як визначено в п. 2.2.

Тепер, маючи правильні центри кіл, можна виконати розрахунок координат.

Останнім кроком необхідно повернутись до геодезичної системи координат

Алгоритм роботи можна зобразити наступною блок схемою Рисунок 2.4



Рисунок 2.4 – Алгоритм виконання трилатерації

Висновки до розділу

Розглянуто математичну реалізацію задачі трилатерації як методу визначення координат передавача. Встановлено способи переходу до системи координат для трьох опорних станцій. Розроблено алгоритм вирішення такої задачі, який дозволяє на основі значень довготи, широти опорних станцій та відстані об'єкту від них, визначити його місцезнаходження в декартовій системі координат та перехід від декартової системи координат до геодезичної.

Відстань до об'єкту розраховується залежно від потужності сигналу. Для порівняння точності втрат потужності сигналу в просторі розглянуто наступні моделі: модель Логарифмічної відстані, Окумури – Хата, модель ITU-R. У відповідності до параметричних особливостей моделей встановлено значення, які найкраще відповідатимуть вимірюванням у реальних умовах. З урахуванням встановлених значень проведено моделювання в середовищі Matlab. За результатами математичного моделювання отримано вибірку даних для їх подальшого порівняння зі значеннями отриманими експериментальним шляхом.

РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА МЕТОДІВ ТА МОДЕЛЕЙ

В даному розділі розглядається створення пристрою прийому-передачі для реалізації мережі LoRa, проводиться аналіз обміну даними між приймачем та передавачем, виконується моделювання процесів трилатерації, проекції та визначення геолокації.

В якості обладнання спроектуємо модуль прийому-передачі. Він дозволить виконувати вимірювання за технологією LoRa, які буде проведено у два етапи.

Першим етапом проведена мало масштабна перевірка для системи із одного приймача та одного передавача. Така конфігурація дозволить отримати опорні данні для вибору моделі втрат у просторі. Відстань, розрахована за рахунок обраної моделі, буде використана для трилатерації положення передавача відносно базових станцій (приймачів).

Другим етапом побудовано систему для трьох опорних станцій (приймач), для яких буде визначено місцезнаходження (координати). Вони фіксуватимуть потужність переданого сигналу від передавача, положення якого необхідно визначити. За рахунок вимірних значень буде розв'язана задача трилатерації та визначено місцезнаходження (координати) передавача.

3.1. Проектування пристрою прийому – передачі

Для проведення експериментальних вимірювань необхідно спроектувати простий пристрій прийому – передачі. Він дозволить отримати реальні значення потужності втрат в тракті передачі для їх подальшого обрахунку.

Оскільки пристрій повинен підтримувати передачу LoRa, необхідно розпочати з аналізу архітектури для даної технології. вона чітко визначена та наведена на Рисунок 3.1.

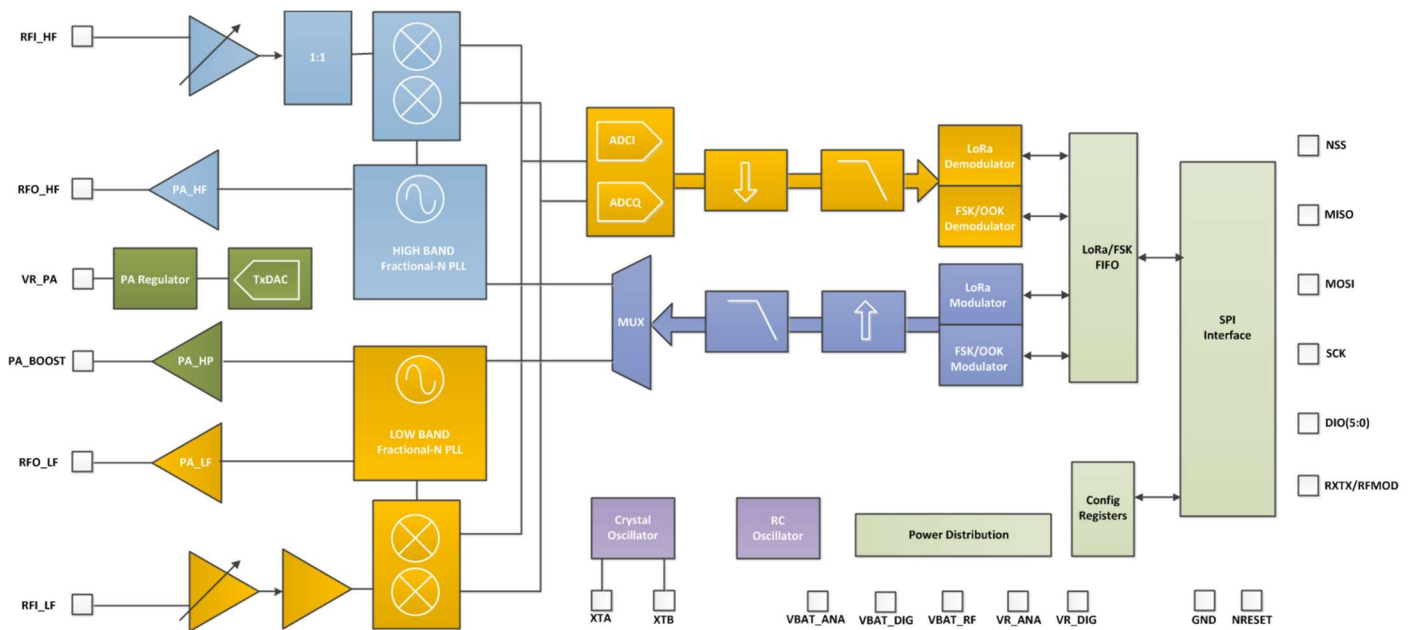


Рисунок 3.1 – Архітектура модуля LoRa

Важливим є аналіз конфігуруючих регістрів (Config Registers), оскільки вони визначають основні параметри системи. Значення в цих регістрах встановлюються через інтерфейс SPI. Найпростішим рішення буде використання мікроконтролера для конфігурації модуля, єдиною вимогою для якого є підтримка інтерфейсу SPI. Також буде використано просту світлодіодну індикацію, для налагодження взаємодії з користувачем. Із аналізу випливає наступна структурна схема Рисунок 3.2.



Рисунок 3.2 – Схема структурна

The schematic diagram illustrates a remote control system for a lighting fixture, consisting of a transmitter (TX) and a receiver (RX).

Transmitter (TX) Components:

- Microcontroller (D021):** DS18B20, connected to a 3.3V power source (XP1) and a 3.3V signal source (XP2).
- Power Source (XP1):** 3.3V, connected to the TX and RX.
- Signal Source (XP2):** 3.3V, connected to the TX and RX.
- Other Components:** R1 (10 kOhm), C1, SB1, SB2, Z01, and various LEDs (HL1, HL2, HL3, HL4, HL5).

Receiver (RX) Components:

- Microcontroller (D022):** DS18B20, connected to a 3.3V power source (XP1) and a 3.3V signal source (XP2).
- Power Source (XP1):** 3.3V, connected to the TX and RX.
- Signal Source (XP2):** 3.3V, connected to the TX and RX.
- Other Components:** R1 (10 kOhm), C1, SB1, SB2, Z01, and various LEDs (HL1, HL2, HL3, HL4, HL5).

Connections:

- The TX is connected to the RX via a 3.3V signal line.
- The TX is connected to the RX via a 3.3V power line.
- The TX is connected to the RX via a 3.3V ground line.

Реалізацією даної схеми став наступний модуль Рисунок 3.4. Його функціонал дозволяє конфігурувати радіомодуль необхідним нам чином. Також мікроконтролер керує процесами прийому – передачі, та зберігає все данні про пакети в пам'ять для їх подальшого зчитування та обробки.

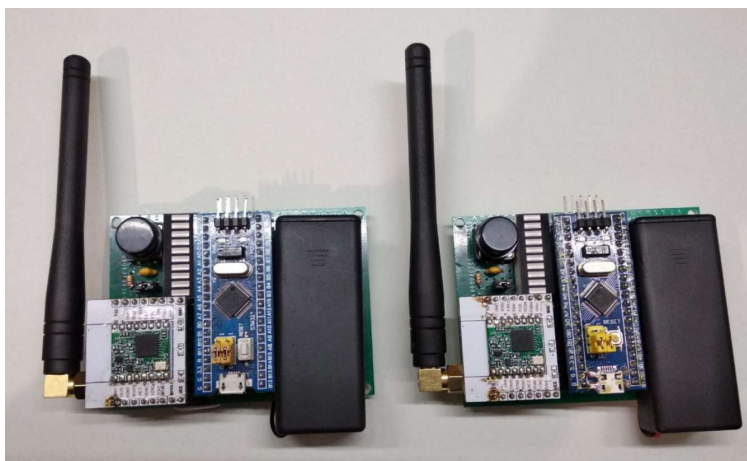


Рисунок 3.4 – Модуль прийому – передачі

3.2. Вимірювання опорних значень потужності

Відповідно до Рисунок 2.1 весь шлях передачі сигналу характеризується втратами/підсиленням сигналу на різних ділянках. Для точного виміру потужності втрат за формулою (1.1) важливо виміряти значення втрат в тракті прийому – передачі. Таким чином, необхідно визначити значення для підсилення антени, втрат в кабелі, чутливості приймача.

Щоб визначити підсилення антени G_{R/T_x} достатньо взяти це значення із специфікації. Для обраної антени HP-433-3800N підсилення складає 3 (dBi). Втрати в кабелі відповідають втратам між вихідним роз'ємом для підключення антени та вихідним роз'ємом радіомодуля для антени. Це значення буде виміряно за допомогою аналізатора спектру HP Agilent 8565EC Рисунок 3.5



Рисунок 3.5 – Аналізатора спектру HP Agilent 8565EC

Вимірювання буде проводитися наступним чином Рисунок 3.6. Вихід для антени з радіомодуля буде підключено на вхід в аналізатора спектру. Аналізатор буде налаштовано на робочу частоту 433 МГц. Потужність сигналу передачі визначена специфікацією технології LoRa та становить 20 дБм. Виміряне значення покаже втрати в тракті передачі, а саме потужність сигналу на виході радіомодуля.



Рисунок 3.6 – Вимірювання втрат в тракті передачі

За результатами вимірювання визначено, що втрати в тракті передачі становлять 7 дБм Рисунок 3.7

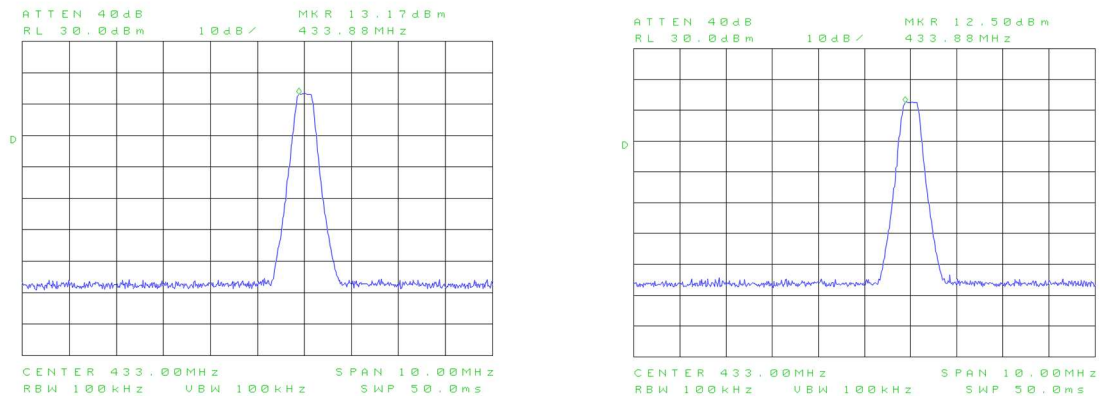


Рисунок 3.7 – Потужність сигналу на виході радіомодуля

При розрахунку значення втрат в формулі (1.1) буде враховано це значення.

Останнім важливим параметром при розрахунках є чутливість приймача в радіомодулі. Архітектура технології LoRa передбачає можливість вимірювань потужності сигналу пакету, який було прийнято. Важливим є визначити, наскільки точно це вимірювання виконується в модулі.

Вимірювання будуть виконуватись в безлунній камері для мінімізації завад Рисунок 3.8. На вхід аналізатора спектру буде підключено антену а поряд розміщено приймач. Передавач буде розміщено на відстані в 1 м на одній висоті з приймачем. Після передачі пакету буде виміряно значення між потужністю сигналу, яку виміряв приймач та аналізатор спектру.

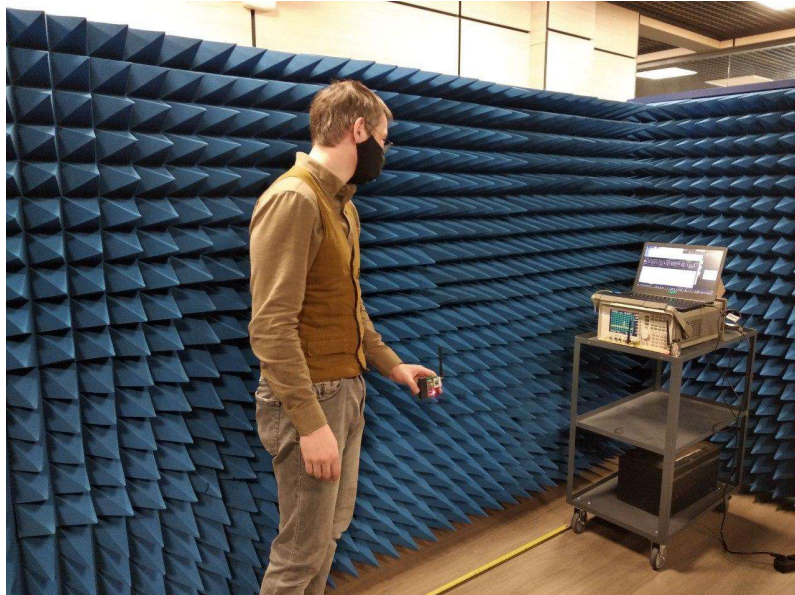


Рисунок 3.8 – Вимірювання втрат на відстані 1 м

За результатами вимірювань отримано наступні значення. Потужність прийнятого сигналу на аналізаторі склала – 24.5 дБ (Рисунок 3.9). Значення, отримане на аналізаторі спектру, буде використовуватись в якості $L_{PL}(1)$ при моделюванні втрат на трасі для методу логарифмічної відстані.

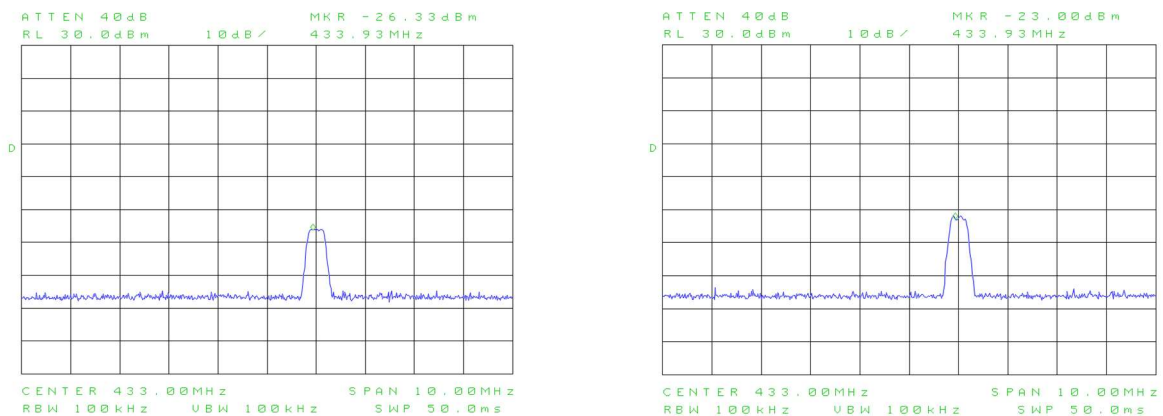


Рисунок 3.9 – Потужність сигналу прийнятого аналізатором

Потужність прийнятого сигналу в приймачі становить мінус 30 дБм. З урахуванням втрат в кабелі з обох сторін фактичне значення потужності становить

мінус 23 дБм. Це значення відрізняється від значення отриманого на аналізаторі в межах 2 дБм. Отже приймач імплементований в систему LoRa працює досить точно для наших потреб.

3.3. Вимірювання потужності при змінній відстані

Спочатку буде проведено експеримент для комбінації одного передавача та приймача. Приймач буде розміщено на висоті 2 м Рисунок 3.10

Оператор з передавачем буде надсилати посилку на відстані в діапазоні 1-200 м з кроком в 50 м. Буде проведено серію вимірів, після чого отримане значення потужності сигналу буде усереднене та порівняне з результатами моделювання.



Рисунок 3.10 – Стенд для вимірювань втрат потужності

За результатами експерименту отримано наступні значення потужності.

Таблиця 3.1 – Отримане значення потужності

Відстань, м	Потужність, дБм						Середнє, дБм
	1	2	3	4	5	6	
1	-46	-41	-34	-48	-37	-34	-41
50	-61	-62	-63	-65	-64	-65	-63
100	-78	-74	-78	-77	-73	-79	-76
150	-82	-86	-79	-80	-79	-85	-81
200	-90	-94	-101	-85	-98	-93	-94

Отриманні значення відображають змінну P_{RX} формули (1.1). Для того, щоб отримати значення потужності втрат в трасі необхідно виконати наступний обрахунок.

$$L_{PL} = P_{Tx} + G_{Rx} + G_{Tx} - G_{cabelTx} - G_{cabelRx} - P_{RX}$$

Де G_{cabel} – втрати в тракці передачі радіомодуля. З попередніх вимірювань визначено значення мінус 7 дБм для G_{cabel} . Формула набуває наступного вигляду:

$$L_{PL} = 20 + 3 + 3 - 7 - 7 - P_{RX} = 12 - P_{RX}$$

Після перерахування значення для L_{PL} становитиме

Таблиця 3.2 – Значення втрат на трасі

Відстань, м	Середнє, дБм
1	-29
50	-51
100	-64
150	-69
200	-82

Маючи значення для втрат на трасі, його можна порівняти із значенням моделювання. В таблиці наведено середньо квадратичне відхилення для кожної моделі.

Таблиця 3.3 – Похибка між виміряним та вирахуваним

Середньо квадратичне відхилення				
Логарифмічної відстані	Окумури – Хата			ITU-R
	Міська	Приміська	Відкрита	
87	461	323	481	1221

Графічне представлення Рисунок 3.11.

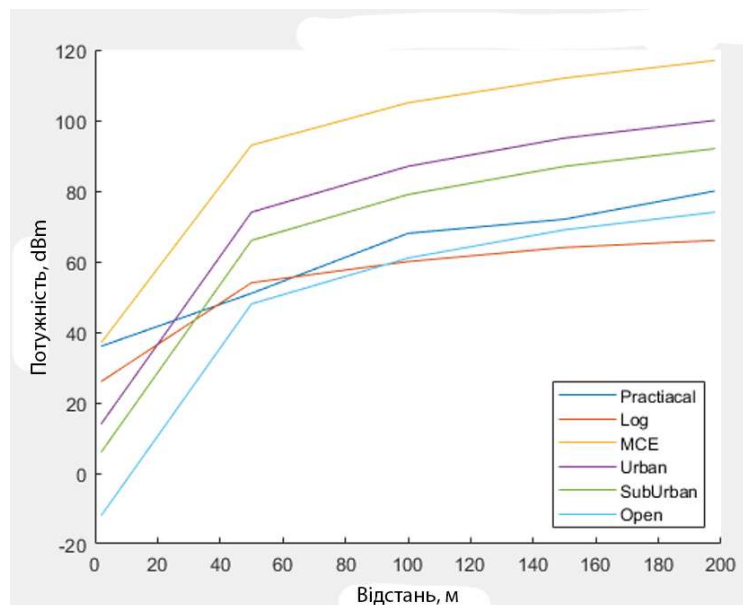


Рисунок 3.11 – Порівняння вимірювань з моделюванням

За результатами вимірювань прийнято використовувати модель логарифмічної відстані як таку, що найточніше описує втрати сигналу в наших умовах навколишнього середовища.

Відповідно до формули розрахунку втрат було виведено обернену для розрахунку відстані. За результатами розрахунку отримано наступні значення

Таблиця 3.4 – Порівняння точності обрахунку

Опорна відстань, м	Розрахована із втрат, м
2	6
50	35
100	251
150	398
200	1000

Як бачимо із значень, навіть при найменшому відхиленні, зворотній розрахунок має досить суттєву похибку. Необхідно визначити причини такої похибки та встановити способи її мінімізації.

3.4. Проведення експерименту для системи приймачів

У якості місця для проведення експерименту було обрано відкриту місцевість, площиною 250 метрів квадратних Рисунок 3.12. Приймачі було розміщено за наступними координатами.

Приймач А:

```
LatA = 50.504180;  
LonA = 30.412714;
```

Приймач В

LatB = 50.504292;
LonB = 30.412219;

Приймач С:

LatC = 50.503703;
LonC = 30.412029;

Методика експерименту полягала у наступному:

1. Приймачі вмикаються на прийом пакету.
2. Передавач фіксується у визначеній координаті та починає передачу пакетів.
3. Після прийому 10 пакета данні з приймачів збираються для подальшої обробки.
4. Місце передавача змінюється
5. Повторюємо кроки 2-3 ще для двох координат.

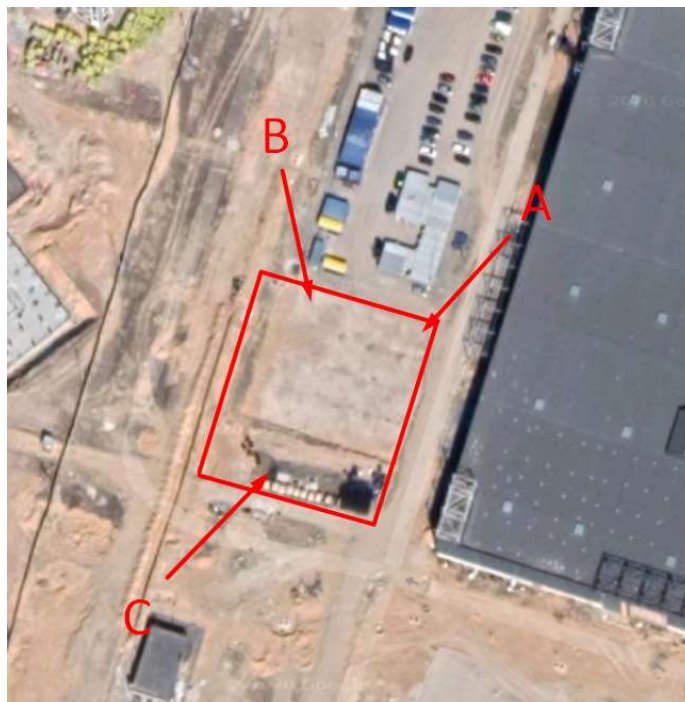


Рисунок 3.12 – Область експерименту

Для трьох серій вимірювання було обрано наступні положення передавача

```
LatD_th_1 = 50.5037611;
LonD_th_1 = 30.4125159;
LatD_th_2 = 50.503936;
LonD_th_2 = 30.412372;
LatD_th_3 = 50.504193;
LonD_th_3 = 30.411781;
```

Після проведення експерименту було зібрано та усереднено наступні данні:

Таблиця 3.5 – Значення потужності отримані в ході експерименту

Номер приймача	Номер експерименту		
	1	2	3
1	-106	-97	-112
2	-103	-96	-96
3	-95	-95	-93

Використовуючи метод логарифмічних втрат відстані було отримано відстань, яка базувалась на практичних вимірюваннях.

Таблиця 3.6 – Відстань розрахована з потужності, м

Номер приймача	Номер експерименту		
	1	2	3
1	141	50	282
2	100	45	45
3	40	40	32

Використовуючи метод ортодоми, описану в п 1.4, теоретично вирахуємо відстань між відомими координатами

Таблиця 3.7 – Відстань розрахована за методом ортодоми для теоретичних координат

Номер приймача	Номер експерименту		
	1	2	3
1	48	36	65
2	62	41	32
3	35	35	57

Використовуючи той самий метод ортодоми тепер розрахуємо відстань для координат приймача, отриманих після трилатерації.

Таблиця 3.8 – Відстань розрахована за методом ортодоми для теоретичних координат

Номер приймача	Номер експерименту		
	1	2	3
1		35	
2		6	
3		60	

Через похибку розрахунку нас задовольняють лише 1 вибірка, для 2 експерименту. Саме вона буде використана для побудови проекції на земній кулі. Використано сервіс Google Earth для відображення отриманих результатів Рисунок 3.13.



Рисунок 3.13 – Проекція отриманих результатів на мапі

Висновки до розділу

Спираючись на розроблені структурну та принципову схеми, виготовлено модуль для прийому/передачі. Оскільки в якості опорної величини для аналізу виступає потужність сигналу, для модуля визначено базові характеристики, які впливатимуть на потужність прийому/передачі сигналу.

Втрати в тракті прийому/передачі становлять 7 дБм, підсилення антени складає 3 дБм. Також виміряно значення опорної потужності, воно становить 23 дБм. Порівняння обрахованих втрат, отриманих в результаті експерименту, з модельованими встановило найменше середньоквадратичне відхилення для моделі логарифмічної відстані. Данна модель обрана для розрахунку відстані в повномасштабному експерименті.

Проведено повномасштабний експеримент з використанням мережі LoRa: на відкритій місцевості розміщено 3 приймача та 1 передавач. Виконано 3 вимірювання для різних положень передавача. За результати отримані значення мають значну похибку від теоретичних. Це пов'язано з похибкою вимірювань або неточністю методу обрахунку.

РОЗДІЛ 4 МОДИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ

В даному розділі розглянуто шляхи вирішення проблем, пов'язаних з похибкою отриманих результатів. Проаналізовано причини їх виникнення та досліджено механізми для пошуку оптимальних шляхів подолання похибки.

4.1. Виявлення причин похибки

Отримані результати свідчать про наявність певної похибки обрахунку, оскільки координати місцезнаходження були отримані із зсувом від очікуваного місцезнаходження. Ймовірні наступні причини, як впливають на точність обрахунку:

1. Точність визначення координат опорних станцій та передавача під час експерименту
2. Коректність вимірювання потужності втрат на шляху
3. Коректність визначення відстані на основі потужності.

По-перше, одною з опорних величин при вирішенні задачі трилатерації є координати опорних станцій. В нашому випадку вони були визначені за рахунок GPS систем в мобільному телефоні. Такі системи мають свою похибку у визначенні місцезнаходження. Також їх точність залежить від якості сигналу на місцевості, де проводиться вимірювання. Це стосується і визначення координат передавача під час кожного виміру.

По-друге, технологією LoRa передбачено декілька способів вимірювання потужності. Перший полягає у вимірюванні RSSI безпосередньо конкретного пакету у певний момент часу, який обирається під час прийому повідомлення. Він не досить широко використовується, оскільки може дати не достатньо точний результат в обраний момент часу. Другий, вже загально розповсюджений метод, є так зване RSSI Packet. Це значення усереднюється для всіх значень вимірної потужності за останню секунду. Таким чином, ми ніби акумулюємо отримані

значення після чого рахуємо середнє. Саме такий спосіб використовувався в усіх попередніх вимірюваннях. Значення для потужності зчиталося з регістру та обраховувалось за наступною формулою, яка визначена виробником:

$$RSSI = -164 + 16/15 * PacketRssi \quad 4.1$$

Де $PacketRssi$ – усереднене значення потужності.

Проте є третій менш розповсюджений, проте досить важливий спосіб визначення значення потужності при вимірюванні. Він відштовхується не від потужності сигналу самої посилки. А від значення SNR – відношення корисного сигналу до шуму. Виробник технології пропонує наступну формулу для обрахунку

$$RSSI = -164 + PacketRssi + PacketSnr * 0.25 \quad 4.2$$

Де $PacketSnr$ – відношення сигнал шум.

Такий спосіб обрахунку використовується в умовах, коли значення $SNR < 0$. Це означає, що під час вимірювання умови передачі були такі, що сигнал виявився занадто слабким, тому його якісніше характеризувати по відношенню до рівню шумів.

По-третє, присутні певні неточності при моделюванні методів втрат потужності в середовищі. Для методу логарифмічних втрат не визначено коефіцієнт втрат в навколишньому середовищі γ . Використовувало значення 2, стандартне для умов повітря, як середовища передачі без врахування завад. Для методу Окумури-Хата висота опорних станцій використовувалась становила 2 м, що відповідає умовам експерименту. Проте даний метод представляє з себе аналіз емпіричних даних, які спираються на умови де приймач знаходиться мінімум на висоті в 30 м. Це означає, що для інших умов значення отримані з вирахування мають певну похибку.

Це пов'язано з так званою ближньою зоною антени. Вона пов'язана з електромагнітними характеристиками сигналу під час радіопередачі. В цій сигнал ще не сформувався для того щоб бути коректно демодульованим. Приклад формування такої зони показано на Рисунок 4.1.

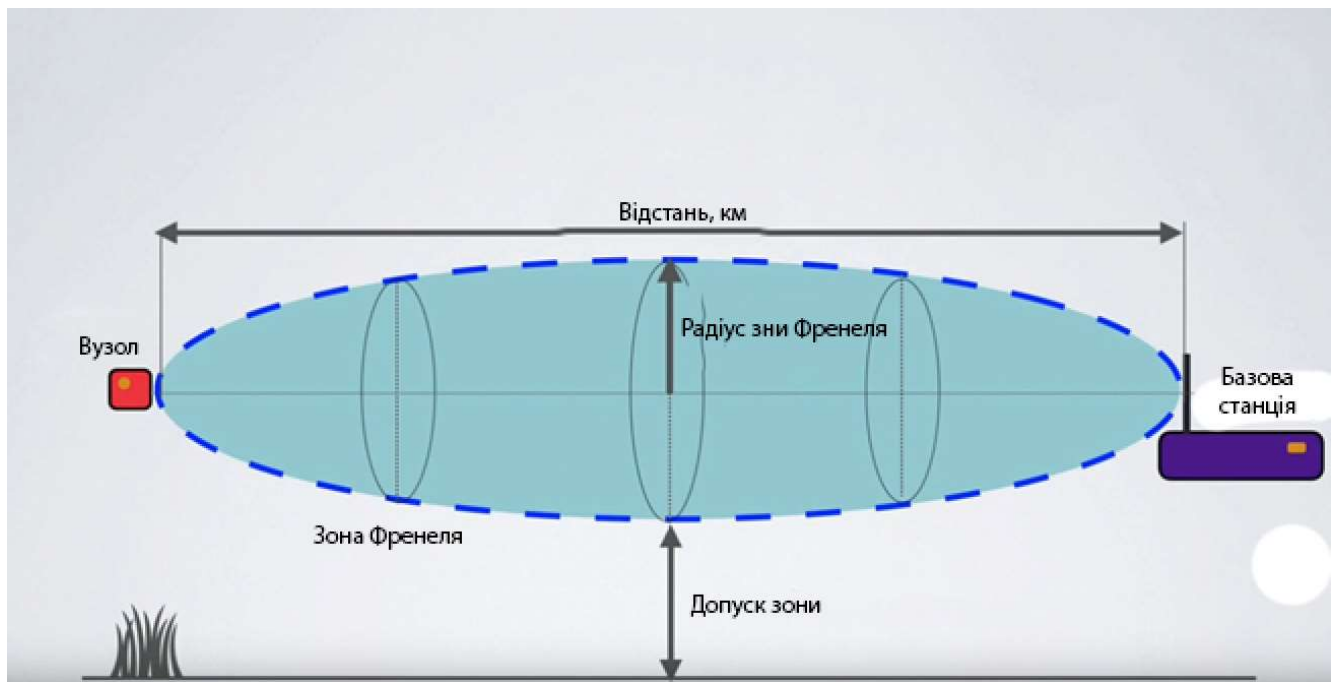


Рисунок 4.1 – формування ближньої зони

В нашому випадку радіус вільної зони повинен становити мінімум 3 м. В іншому випадку не можна стверджувати про 100 % переданої потужності від передавача приймачу. Оскільки будуть присутня похибка у формуванні поля радіосигналу. Приклад такої похибки можна представити на Рисунок 4.2

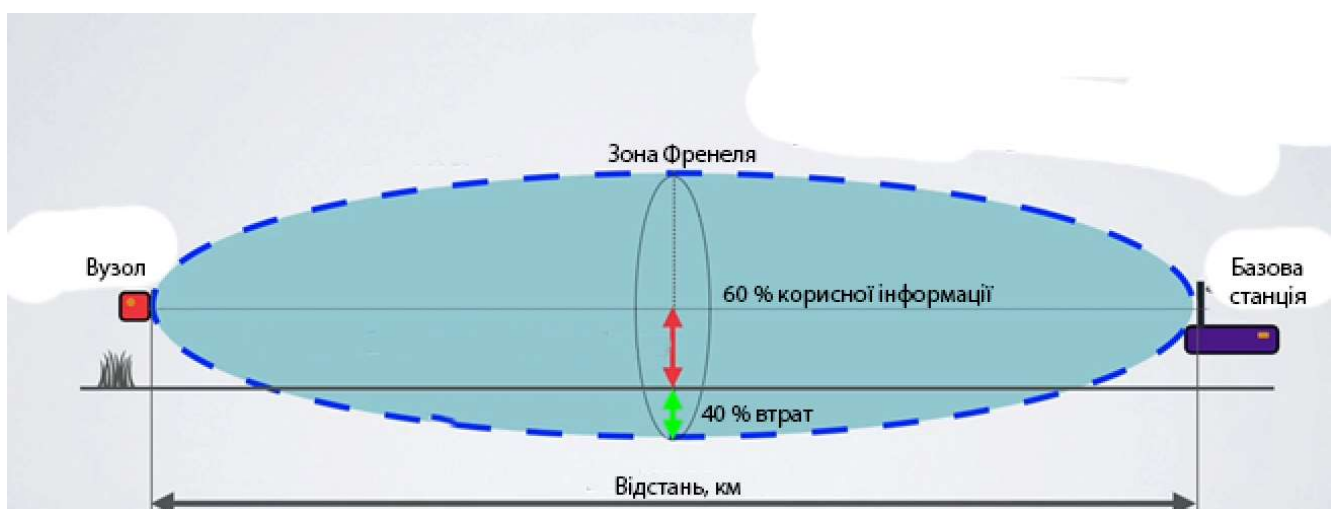


Рисунок 4.2 – Похибка формування сигналу.

В такому випадку сигнал має умовно лише 60 % корисної інформації. Тому ми використовуємо коефіцієнт 0.6 при визначенні радіусу ближньої зони. Оскільки ми працюємо в околі 100 м від опорних станцій, то можна обрахувати мінімальну висоту для такої відстані. Результати наведені в табл. 4.1

Таблиця 4.1 – Визначення мінімальної висоти опорної станції

Точність, %	Відстань, м	Радіус зони, м
100	100	2.94
60	100	2.28

Тому загальною рекомендацією буде розміщувати приймач якомога вище, для подолання ефекту ближньої зони. Саме тому в методі Окумури-Хата використовуються данні для положення приймача на мінімальній висоті в 30 м.

4.2. Способи зменшення похибки

Відповідно до визначених причин можна запропонувати наступні способи мінімізації похибки.

По-перше, для мінімізації похибки в визначенням координати варто розміщувати опорні станції в місцях, координати яких або заздалегідь відомі або їх можна визначити точніше, ніж це робить системи мобільного позиціювання GPS. Найпростішим буде використовувати місцевість з опорними орієнтирами, координати яких потім можна буде визначити на мапі, використовуючи інтернет ресурси. Це можуть бути будівлі, ліхтарі, пам'ятники.

По-друге, використовувати для розрахунку втрат потужності декілька формул та брати до уваги відношення сигнал-шум. Особливо це стосується ситуації, коли в зоні передачі присутня велика кількість завад.

По-третє, виконати опорні вимірювання для ситуації, які ближче якісніше відповідають умовам математичних моделей. Наприклад спробувати розмістити приймач якомога вище.

Відповідно до визначених вимог було прийнято рішення провести ще одну низку вимірювань з метою пересвідчитися у коректності прийнятих рішень.

Найкраще умовам експерименту відповідала траса з пішохідним переходом
Рисунок 4.3 – Вимірювання для відстані 1 км.



Рисунок 4.3 – Вимірювання для відстані 1 км.

Приймач було закріплено на пішохідному мості, що становило приблизно 10 м. Відстань для проведення експерименту – 900 м. Вимірювання виконуються через кожні 100 м. За результатами проведених вимірювань отримано наступні дані.

Таблиця 4.2 - Результати вимірювань на відстані 1 км

Відстань	RSSI Packet	SNR	RSSI Packet+SNR	Кінцеве RSSI
50	-46,5	11,4	-46,5	-46,5
100	-88,0	7,0	-88	-88
200	-96,5	-1,4	-101,875	-101,875
300	-98,0	-5,8	-107,75	-107,75
400	-98,0	-8,8	-110,75	-110,75

Відстань	RSSI Packet	SNR	RSSI Packet+SNR	Кінцеве RSSI
500	-98,0	-7,8	-109,75	-109,75
600	-98,0	-9,0	-111	-111
700	-98,5	-22,1	-124,625	-124,625
800	-98,5	-20,4	-122,875	-122,875
900	-98,0	-19,8	-121,75	-121,75

Аналіз даних свідчить наступне:

1. Для відстані більше 200 м потужність передавача занадто мала, щоб аналізувати складову потужності для прийнятого пакета даних.
2. Для відстані, починаючи з 200 м, відношення сигнал/шум стає від'ємним. Це є достатньою умовою для використання іншої формули для розрахунку RSSI. Перераховані значення виділені як «RSSI Packet+SNR»
3. Кінцеве RSSI визначено за порогом SNR, де для додатних значень були взята потужність «RSSI Packet», а для від'ємних «RSSI Packet+SNR»
4. Проаналізувавши дані, можна побудувати графік та повторно промодельовати втрати на трасі

Крива «Practical» описує отримані результати. З отриманих значень бачимо, що на відстані після 200 метрів відбувається зміна характеристики Рисунок 4.4 .

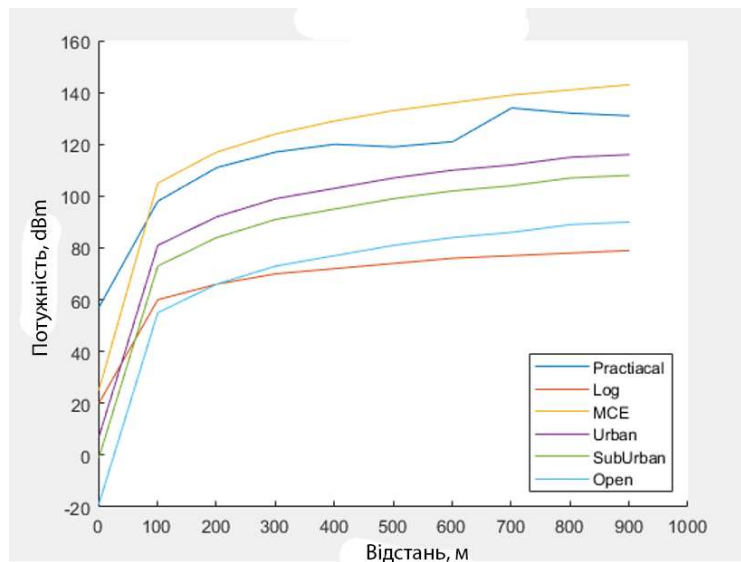


Рисунок 4.4 – Порівняння отриманих даних

Тепер необхідно виконати повторний розрахунок квадратичного відхилення Таблиця 4.3.

Таблиця 4.3 – Середньо квадратичне відхилення для нових даних

Середньо квадратичне відхилення				
Логарифмічної відстані	Окумури – Хата			ITU-R
	Міська	Приміська	Відкрита	
2227	364	610	1632	191

В результаті визначено, що для більш масштабної моделі доцільно використати розрахунок за рекомендацією ITU-R, ніж модель логарифмічної відстані.

4.3. Simulink-модель системи позиціонування

Розглянуті рішення втілено в моделі Simulink. Блок схема моделі наведена на Рисунок 4.5.

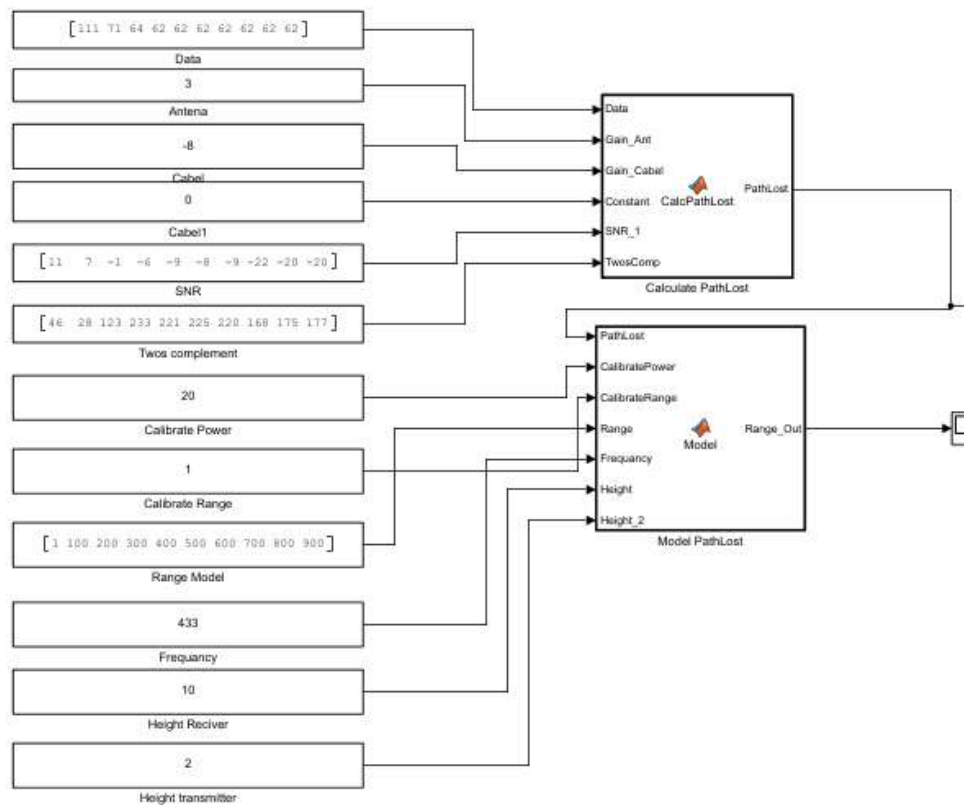


Рисунок 4.5 – Модель Simulink

Вона дозволяє автоматизувати процес обробки даних та зробити обробку більш гнучкою та універсальною. Процес обробки логічно розділений на 3 етапи.

По-перше, виконується коректний обрахунок потужності втрат сигналу у блоці “Calculate Path Lost”. Тут враховується чиста потужність сигналу отримана приймачем. На наступному етапі виконується коректне перерахування у значення в дБм з урахування параметру SNR. Після цього до враховуються технічні параметри тракту передачі, такі як потужність антени та втрати в кабелі.

По-друге, виконується моделювання для визначених методів. Після цього результати моделювання порівнюються з практичними даними та визначається середньоквадратичне відхилення. Із представлених моделей обирається така, для

якої відхилення буде найменшим. Саме вона буде використана на останньому кроці.

По-третє, виконується перерахунок потужності у дальність. Далі це значення буде використано при виконанні операції трилатерації та визначення місцезнаходження об'єкта.

Для даних, представлених на Рисунок 4.5 було проведено моделювання, результати якого представлені на Рисунок 4.6. На виході отримано значення для відстані у відповідності до вхідних параметрів потужності. Як бачимо розрахунок відстані за моделями Окумури-Хата та Логарифмічної відстані не дає коректного відображення значень. Результати для моделі ITU-R мають певну похибку проте вони найточніше описують реальні умови.

34.96	4938	493.8	4.401e+04	6.216e+04	5.54e+04	6.216e+04	2.777e+05	2.206e+05	2.206e+05	Hata
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Log
26.61	267.1	91.36	740	869.2	823.8	869.2	1746	1568	1568	ITU-R

Рисунок 4.6 – Результати «Simulink» моделювання

Така модель слугує потужним інструментом для обробки даних. З її допомогою можна будувати системи для створення баз даних, аналізу інформації при виконанні повномасштабних вимірювань. Окрім цього, така модель може бути імпліментована у якості програмного рішення на шлюз. Це дозволить спростити розробку програмного продукту та обробляти інформацію безпосередньо на сервері без використання додаткового обладнання.

Висновки до розділу

Проведено аналіз похибок, які виникли при проведенні експериментальних вимірювань. До причин таких похибок можна віднести точність визначення координат опорних станцій, коректність вимірювання втрат сигналу та виконання розрахунку відстані.

Визначено декілька способів мінімізації похибок. Для визначення точних координат опорних станцій пропонується не використовувати допоміжні системи

вимірювання, а за можливості позиціонувати приймачі в точно визначених координатах.

При розміщені опорних станцій враховувати висоту. В даному випадку передбачено розміщувати приймачі в найвищих точках, це дозволить нівелювати ефект зворотної зони антени. Спираючись на специфікацію технології LoRa, при розрахунку потужності брати до уваги на відношення сигнал/шум (SNR). Оскільки на великих відстанях потужність сигналу достатньо мала, щоб приймач зміг точно її визначити. Розрахунок з урахуванням SNR дозволяє вираховувати втрати потужності сигналу на відстані понад 500 м в міських умовах.

Проведено додаткове вимірювання для відстані між приймачем та передавачем у 1 км. За результатами експерименту визначено, що на відстані понад 200 м вимірювання потужності посилки не є інформативним і необхідно враховувати відношення SNR.

При порівнянні отриманих результатів з моделюванням визначено, що мінімальне відхилення між значеннями буде для моделі втрат ITU-R. З чого можна зробити висновок, що при виборі моделі важливим є враховувати параметри навколишнього середовища, які можуть значно впливати на характер втрат потужності в просторі.

На основі проведеного аналізу розроблено Simulink-модель. Вона може автоматично обраховувати вхідні данні вимірювань та параметри для моделей втрат. Це дозволяє спростити процес розрахунку, а імплементація такої моделі в мережу LoRa дозволить проводити вимірювання у великому масштабі для великої площі та кількості приймачів. За рахунок цього можна будувати бази даних для місцевості, які в майбутньому будуть слугувати навчальними вибірками для систем позиціонування.

РОЗДІЛ 5 РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ В СТАРТАП-ПРОЕКТІ

Враховуючи те, що в роботі були запропоновані рішення, що можуть бути безпосередньо втілені в комерційних системах, які базуються на технології LoRa, буде доцільним розглянути можливий план реалізації стартап-проекту комерційного системи пеленгації з використанням запропонованих в роботі рішень.

Далі проводиться поетапне розроблення стартап-проекту, в чіткій відповідності до вимог методичних вказівок [23].

5.1. Зміст ідеї

Зміст ідеї стартап-проекту, можливі напрямки застосування та вигоди для користувача наведено в Таблиця 5.1.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Реалізація системи позиціонування на основі технології LoRa	Великомасштабні системи позиціонування	Створення систем в межах міста для позиціонування громадського транспорту
	Середньомасштабні системи позиціонування	Створення локальних систем на підприємствах для позиціонування товарів/устаткування

Створюваний пеленгатор повинен бути точнішим, дешевшим у використанні, простішим в реалізації та в налаштуванні до різних умов в порівнянні з існуючими аналогами. Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно з пропозиціями конкурентів наведено в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Сильні, слабкі та нейтральні характеристики ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	товари/концепції конкурентів				W (слабк а сторон а)	N (нейт- ральна сторона)	S (сильна сторон а)
		Даний проект	X-Keeper	StarLine	Pandora			
1.	Швидкість обміну даними	Низька	Середня	Середня	Середня	+		
2.	Точність позиціонування	Середня	Висока	Середня	Середня		+	
3.	Енергоефективність	Висока	Низька	Низька	Низька			+
4.	Простота інтеграції	Висока	Середня	Низька	Низька			+
5.	Чутливість	Висока	Середня	Висока	Висока		+	

На основі визначеного переліку сильних, нейтральних та слабких характеристик ідеї проекту, можна стверджувати про його конкурентоспроможність.

5.2. Аудит

Далі проводиться аудит технології, за якою можна реалізувати ідею проекту. Результати наведено в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	LoRa трекер	Трекер реалізується у вигляді цифрової схеми	Дана технологія не розповсюджена та потребує розробки.	Технологію можна розробити, вона потребує значних вкладень капіталу
		Трекер реалізується на основі LoRa передавача	Технологія наявна.	Технологія доступна, проте потребує розробки програмного продукту.
2.	Система позиціонування	Позиціонування виконується на основі програмного забезпечення для існуючих систем	Програмний продукт розробляється одноразово. Технологія потребує наявної інфраструктури.	Технологія доступна проте потребує значних вкладень в створення інфраструктури

Через значні переваги для кінцевих користувачів та відносну технологічну простоту, було обрано реалізацію LoRa трекеру. Далі проводиться аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту. В табл. 5.4. наведено результати аналізу попиту.

Таблиця 5.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку	Характеристика
1.	Кількість головних гравців, од	3
2.	Загальний обсяг річних продаж, \$	
3.	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4.	Наявність обмежень для входу	необхідна рекламна кампанія
5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	можуть вимагати сертифікації та стандартизації при інтеграції в інфраструктуру.
6.	Середня норма рентабельності в галузі, %	

За результатами аналізу (табл. 5.4), ринок трекерів є привабливим для входження. Через високу рентабельність впровадження проекту є доцільним.

В табл. 5.5 наведено потенційні групи клієнтів, їх характеристики та орієнтовний перелік вимог до товару.

Таблиця 5.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Потреба у моніторингу місцезнаходження устаткування, товарів	Компанії перевізники (Громадський транспорт, пошта, доставка)	Цільовою групою є компанії, які проводять аналіз та моніторинг даних про власне устаткування	Простота інтеграції Висока точність позиціонування
2.	Потреба у моніторингу місцезнаходження власних ресурсів	Сегмент звичайних користувачів	Цільовою групою є люди, які потребують у інформації стосовно місцезнаходження їх власності.	Простота використання Низька вартість Довго тривалість роботи.

Виходячи з аналізу вимог споживачів, далі проводиться аналіз ринкового середовища. Відповідні фактори, що сприяють та заважають ринковому впровадженню стартап-проекту наведено в табл. 5.6 та табл. 5.7.

5.3. Аналіз ринкового середовища

Таблиця 5.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Потреба в створенні великої інфраструктури	При збільшенні площі роботи пристрою необхідно відповідно збільшувати інфраструктуру мережі	Пошук клієнтів для місць де така інфраструктура вже впроваджена
2.	Недостатня точність позиціонування	Потреба у більшій точності, ніж система може запропонувати	Збільшення характеристик системи за рахунок збільшення її вартості. Додаткова розробка для розширення функціоналу.

Таблиця 5.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Поява нових методів використання даної системи	Після впровадження системи може бути створені незалежні інфраструктури мережі LoRa.	Моніторинг існуючої площі покриття для розширення сфери пошуку клієнтів
2.	Стрімкий зріст продаж	Продажі можуть стрімко зрости в результаті успішності продукту	Вкладати отримані кошти в розвиток та рекламу продуктів

Далі проводиться встановлення загальних рис конкуренції на ринку (табл. 5.8) та більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (табл. 5.9).

Таблиця 5.8 - Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції: монополія	Велика кількість конкурентів які впроваджують загальну систему координації	Застосовувати агресивний маркетинг для входження в ринок
2. Рівень конкурентної боротьби: глобальна	Основні гравці мають свої представництва в більшості країн світу	Налагодити співпрацю з провідними потенційними клієнтами
3. За галузевою ознакою: внутрішньогалузева	Препроцесори пеленгації займають свою, окрему галузь	Активно відстежувати продукти конкурентів
4. За видами товарів: товарно-видова	Різні види алгоритмів обробки конкурують між собою	Створити алгоритм трилатерації, що не поступається аналогам
5. За характером конкурентних переваг: цінова та нецінова	Низька вартість важливіша за якість	Продукт повинен бути якісним, при цьому мати привабливу ціну
6. За інтенсивністю: немарочна	Конкуренція відбувається однаково як за ціною, так і за функціональністю	Забезпечити високе співвідношення ціни до функціональності

Таблиця 5.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти (бар'єри ринку)	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
		Широке розповсюдження технології, значні капітали	Наявна інфраструктура для використання продукту	Звичність використання існуючої технології	Відсутні
Висновки	Відбувається активна боротьба за ринок	Є можливість входу на ринок в задовільні строки	Компанії платять за використання інфраструктури	Клієнти не готові використовувати нові системи	Відповідні обмеження відсутні

З огляду на малу кількість прямих конкурентів, входження на ринок можливе. Необхідно забезпечувати високу якість та порівняно невисоку ціну для задоволення користувачів, а також створювати власні шляхи дистриб'юції. Далі визначаються та обґрунтовуються фактори конкурентоспроможності. Після чого проводиться аналіз сильних та слабких сторін проекту за визначеними факторами конкурентоспроможності. Результати представлено в табл. 5.10 та табл. 5.11.

Таблиця 5.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурен- тоспроможності	Обґрунтування (чинники значущості фактора для порівняння конкурентних проектів)
1.	Точність позиціювання	На основі проведеного аналізу конкуренції та факторів маркетингового середовища, користувачі вимагають більш простих систем для використання. Які можуть працювати довготривало при забезпеченні такої самої точності, як і продукти замітники.
2.	Проста інтеграція	Забезпечення простоти інтеграції є важливим моментом. Оскільки є необхідність створення малої інфраструктури.
3.	Довготривала роботи	Продукт відрізняється великою енергоефективністю за рахунок чого спроможний конкурувати з товарами заміниками.

Таблиця 5.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін продукту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали (1-20)	Рейтинг товарів конкурентів в порівнянні з запропонованим продуктом						
			3	2	1		1	2	3
1.	Точність позиціювання	12							
2.	Простота інтеграції	7							
3.	Довготривала роботи	18							

Далі на основі виділених ринкових загроз та можливостей, сильних і слабких сторін, проводиться ринковий аналіз можливостей впровадження проекту шляхом SWOT-аналізу, на основі якого в подальшому розроблюються альтернативи ринкової поведінки. Результати наведено в табл. 5.12. та табл. 5.13.

Таблиця 5.12 – SWOT-аналіз стартап-проекту

<i>Сильні сторони:</i> довготривала робота, простота використання, великий радіус дії	<i>Слабкі сторони:</i> потреба в інфраструктурі
<i>Можливості:</i> Збільшений попит для клієнтів які працюють на великій площі на положення об'єктів змінюється не часто.	<i>Загрози:</i> зростає вартість продукту в умовах необхідності створення інфраструктури.

Таблиця 5.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Максимізація власного виграшу (індивідуалізм)	Висока	12 місяців
2.	Максимізація спільного виграшу (кооперація)	Середня	6 місяців
3.	Суперництво	Низька	18 місяців

З зазначених в табл. 5.13 альтернатив обрану першу через вищу ймовірність отримання ресурсів та менший строк реалізації. Далі проводиться розроблення ринкової стратегії проекту. В табл. 5.14 наведено опис цільових груп споживачів.

Таблиця 5.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу в сегмент
1.	Компанії вантажоперевізники	Висока	Середній	Середня	Висока
2.	Індивідуальні користувачі	Висока	Середній	Середня	Низька

За результатами аналізу потенційних груп споживачів, обрано обидві групи. Оскільки при цьому компанія працює з двома сегментами, вона повинна використовувати стратегію диференційованого маркетингу.

5.4. Аналіз стратегій розвитку

Далі проводиться розроблення базової стратегії розвитку, стратегії конкурентної поведінки та стратегії позиціонування. Результати наведено в табл. 5.15 – табл. 5.17.

Таблиця 5.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	Компанії спеціалізовані на вантажоперевезенні	Налагодження взаємозв'язків з даними установами для реклаमाції та забезпечення постійної відповідності продукту вимогам галузі	Значно більша ефективність в порівнянні з конкурентами	Стратегія диференціації
2.	Приватні особи	Створення власного інтернет-магазину та мережі дистрибуції, впровадження агресивного маркетингу	Порівняно невисока ціна при високій ефективності	Стратегія диференціації

Таблиця 5.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є продукт першопрохідцем на ринку	Чи буде компанія шукати нових споживачів або забирати існуючих у конкурентів	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурентів (які)	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Ні	Так	Так, певні елементи інтерфейсу розробника	Стратегія виклику лідера
2.	Ні	Так	Так, певні елементи конструкції та програмного інтерфейсу користувача	Стратегія лідерства

Таблиця 5.17 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Висока точність	Стратегія диференціації	Значно більша ефективність препроцесору в порівнянні з конкурентами	Краща ефективність на ринку, адекватна вартість, розширюваність функціоналу
2.	Здатність ефективно дешевої побудови мережі	Стратегія диференціації	Порівняно невисока ціна при високій ефективності	Високе співвідношення якість/ціна, краща ефективність на ринку, розширюваність

Далі виконується розроблення маркетингової програми проекту: формується маркетингова концепція товару, створюється трьохрівнева модель маркетингу, визначаються цінові межі, формується система збуту та структура маркетингових комунікацій. Результати наведено в табл. 5.18 – табл. 5.22.

Таблиця 5.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Підвищення енергоефективності	Ефективність та технологічність	Пристрій буде працювати довго триваліше що здешевить використання товару
2.	Великий діапазон роботи	Велике покриття місцевості	Робота з меншою кількістю опорних станцій

Таблиця 5.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
1. Товар за задумом	Високоефективний датчик для позиціонування. За рахунок особливостей технології LoRa має велику енергоефективність та діапазон роботи		
2. Товар у реальному виконанні	<i>Властивості/характеристики</i>	<i>М/Нм*</i>	<i>Вр/Тх/Тл/Е/Ор*</i>
	1. Рекомендована вартість: 100 \$	Нм	Вр
	2. Простота інтеграції	Нм	Тх, Е
	3. Точність позиціонування до 10 м	М	Тх
	4. Радіус роботи до 10 км	М	Тх
	Якість: контролюється та перевіряється на кожному етапі розробки		
	Пакування: статична/динамічна бібліотека		
	Марка: LoRaTrak		
3. Товар з підкріпленням	До продажу: демонстраційні стенди в офісі компанії		
	Після продажу: супровід, підтримка, налаштування		

* М/Нм – монотонні/немонотонні; Вр/Тх/Тл/Е/Ор – вартісні/технічні/технологічні/ергономічні/органолептичні.

Таблиця 5.20 – Визначення меж встановлення ціни

Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи користувачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар
Замінники відсутні	200 – 1000 \$	2000 – 500000 \$/міс.	100 – 10000 \$

Таблиця 5.21 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Компанії напряду звертаються до компанії	Задовольняти вимогам тендеру	Збут може виконуватися безпосередньо або через посередника	Безпосередня участь у тендерах
2.	Користувачі можуть купувати товар через інтернет-магазин компанії	Забезпечувати вчасність доставки	Безпосередньо, через власний інтернет-магазин	Власний інтернет-магазин компанії

Таблиця 5.22 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікації, якими користуються цільові клієнти	Обрані ключові позиції	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Компанії вантаж перевізники. напряду звертаються до відділу продажу	Виставки у сфері пеленгації об'єктів	Великий діапазон роботи. Енергоефективніс ть.	Повідомити про появу нового способу визначати місцезнаходжен ня	Ефективність, адекватна вартість, інтегрованість
2.	Користувачі купують товар через інтернет або роздрібну точку продажу	Інтернет, прямі канали комуні- кації типу користувач- користувач	Високе співвідношення якість/ціна	Повідомити про появу універсального пеленгатору з високою якістю та низькою ціною	Невисока ціна при високій якості, краща ефективність на ринку, розширюва- ність та оновлюва- ність програм

Таким чином, було поетапно розроблено стартап-проект: запропоновано та проаналізовано ідею проекту, виконано її технічний аудит, проведено аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту, створено ринкову стратегію проекту та розроблено відповідну маркетингову програму його реалізації.

5.5. Області застосування результатів та очікуваний ефект

Отримані результати можуть бути широко використані при побудові локальних мереж LoRa на підприємствах, в межах міських та сільських ділянок, для приватних споживачів. Розроблені програмні та апаратні рішення можна імплементувати в робочі системи вже існуючої мережі LoRa для збільшення її ефективності.

Створена Simulink-модель може бути використана в сфері геолокації найрізноманітніших об'єктів підприємств, державних установ, приватних клієнтів. Вона слугуватиме для покращення точності, швидкодії та простоти реалізації систем геолокації.

Очікується активне використання розробленої технології через її переваги в порівнянні з існуючими, а саме її високою енергоефективністю, широким діапазоном роботи, простотою впровадження та обслуговування.

Висновки до розділу

Розроблено перший етап створення стартап-проекту. Оскільки кожна наукова робота повинна знаходити своє місце в застосуванні у реальному житті, тому стартап-проект може бути практичним відображенням наукової праці. Висвітлено зміст ідеї проекту шляхом розгляду потенційних зацікавлених осіб, які в майбутньому можуть стати клієнтами запропонованої продукції. Також розглянуто ризики реалізації продукції, а проведений аналіз сильних та слабких сторін надав можливість визначити аспекти, на які слід зробити ставку. Проведено технічний аудит проекту та визначено технології, які використовуватимуться.

Запропоновані технології вже існують, проте їх використання не дає можливість переваги над конкурентом. Проведено аналіз усіх аспектів ринку, який показав, що імплементація проекту можлива в реальних умовах, проте слід враховувати, що на ринку уже існують гравці з досить високою репутацією, що може зіграти негативну роль у впровадженні проекту. Для уникнення провалу проекту необхідно провести потужну рекламну кампанію, в якій донести до споживача усі переваги даного проекту та необхідність обрати саме запропонований продукт.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальну та важливу науково-прикладну задачу підвищення точності методу позиціонування з використанням технології LoRa.

Проведений аналіз показує, що задачу локалізації об'єктів можна вирішити, спираючись на сучасні алгоритми бездротової локалізації з використанням технології LoRa. За результатами порівняння методів геолокації найбільш оптимальним для такої технології, можна вважати метод трилатерації з використанням RSSI ранжування за рахунок простоти його реалізації та точності. Проведений патентний пошук підтверджує отримані результати.

Розглянуто математичну реалізацію задачі трилатерації як методу визначення координат передавача. Встановлено способи переходу до системи координат для трьох опорних станцій. Розроблено алгоритм вирішення такої задачі, який дозволяє на основі значень довготи, широти опорних станцій та відстані об'єкту від них, визначити його місцезнаходження в декартовій системі координат та здійснити перехід від декартової системи координат до геодезичної.

Спираючись на розроблені структурну та принципову схеми, виготовлено модуль для прийому/передачі. Проведено повномасштабний експеримент з використанням мережі LoRa: на відкритій місцевості було розміщено 3 приймача та 1 передавач. Виконано 3 вимірювання для різних положень передавача. Отримані значення мали значну похибку від очікуваних.

Проведено аналіз причин похибки, які виникли при проведенні експериментальних вимірювань. Для визначення точних координат опорних станцій пропонується не використовувати допоміжні системи вимірювання, а за можливості позиціонувати приймачі в точно визначених координатах. При розміщенні опорних станцій враховувати висоту приймача. Спираючись на специфікацію технології LoRa, при розрахунку втрат сигналу брати до уваги відношення сигнал/шум (SNR). Для перевірки ефективності запропонованих

рішень щодо мінімізації похибок було проведено додаткове вимірювання для відстані між приймачем та передавачем у 1 км. При порівнянні отриманих результатів з теоретично обрахованими визначено середньо-квадратичне відхилення з моделями Логарифмічних втрат, Окумури-Хата та ITU-R. Найменше мінімальне відхилення відповідало моделі втрат ITU-R. Таким чином, при виборі моделі обов'язковим є врахування параметрів навколишнього середовища, які можуть значно впливати на характер втрат потужності в просторі.

З урахуванням розглянутих моделей втрат проведено моделювання в середовищі Matlab. За результатами математичного моделювання отримано вибірку даних для їх подальшого порівняння зі значеннями отриманими експериментальним шляхом.

На основі проведеного аналізу розроблено Simulink-модель. Вона може автоматично обраховувати вхідні данні вимірювань та параметри для моделей втрат. Це дозволяє спростити процес розрахунку, а імплементація такої моделі в мережу LoRa дозволить проводити вимірювання у повному масштабі для значної площі та кількості приймачів.

Відповідно до завдань магістерської дисертації було запропоновано стартап-проект. В розробленому стартап-проекті відображено: зміст ідеї проекту, ризики реалізації продукції, аналіз сильних та слабких сторін, технічний аудит та аналіз ринку, які показали, що імплементація проекту можлива в реальних умовах.

Подальший напрям досліджень передбачає створення повноцінної мережі LoRa. Це дозволить здійснювати повномасштабні вимірювання та створювати бази даних з характеристиками для окремих місцевостей. Такі данні слугуватимуть для покращення точності, швидкодії та простоти реалізації систем геолокації.

За матеріалами дисертації опубліковано 1 друковану працю в журналі.

Вищевикладене дозволяє зробити висновок, що завдання на магістерську дисертацію виконано у повному обсязі, а її мета досягнута.

Список літератури

1. Kais M., Bajic E., Chaxel F., Meyer F. A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment // ICT Express. 2018. pp. 1-7.
2. Rouse M. Internet of things [Электронный ресурс] [2020]. URL: <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/Internet-of-Things-IoT> (дата обращения: 10.03.2020).
3. Reiter. Wireless connectivity for the internet of things 2014.
4. Sharan Sinha R., Yiqiao W., Seung-Hoon H. A survey on lpwa technology: Lora and nb-iot // Ict Express. Mar 2017. pp. 14-21.
5. Xu G., Xu. GPS: theory, algorithms and applications // Springer. 2016.
6. Semtech. Low Energy Consumption Design. Camarillo. 2013.
7. Sallouha H., Alessandro C. Localization in long-range ultra narrow band iot networks using rssi. // IEEE International Conference. 2017.
8. Lam K.H., Cheung C.C., Lee W.C. Lora-based localization systems for noisy outdoor environment // Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications. 2017. pp. 278-284.
9. Centenaro M., Vangelista L., Zanella A., Zorzi M. Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the iot and smart city scenarios. // IEEE Wireless Communications. May 2016. pp. 60-67.
10. Semtech. AN1200.22 LoRa Modulation Basics. Camarillo. 2015.
11. Knight M., Seeber B. Decoding lora: Realizing a modern lpwan with sdr. // In Proceedings of the GNU Radio Conference, Vol. 1, 2016.
12. Nordin L. Spreading factor (sf), time on air and (adaptive) data rate. [Электронный ресурс] [2018]. URL: <https://zakelijkforum.kpn.com/lora->

forum- 16/spreading-factor-sf-time-on-air-and-adaptive-data-rate-10908
(дата обращения: 9.9.2018).

13. Rahmadhani A., Kuipers F. When lorawan frames collide. 2018.
14. В.. LoRa [Электронный ресурс] [2018]. URL: <https://lora.readthedocs.io/en/latest/> (дата обращения: 29.03.2020).
15. Dudnik S. METODI VIZNACHENNYA VIDSTANI MIZH EZASOBAMI SENSORNIH MEREZH // Matematichne ta komp'yuterne modelyuvannya. Seri`ya : Tekhni`chni` nauki. 2018. pp. 40-49.
16. Van T.D. Protecting wildlife with lorawan. // The Things Conference. 2018.
17. Gustafsson F., Gunnarsson. Positioning using time-difference of arrival measurements. In (6), pages 553
18. Martin C.B., Roedig U., Voigt , Juan A. Do lora low-power wide-area networks scale? // Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. 2016. P. 59.
19. Petajajarvi J., Mikhaylov K., Roivainen A., Hanninen T., Pettissalo M. On the coverage of lpwans: range evaluation and channel // ITS Telecommunications. 2015. pp. 55-59.
20. Shadow view and internet of life continue as smart parks. [Электронный ресурс] [2018]. URL: <https://www.smartparks.org/news/shadowview-and-internet-of-life-continue-as-smart-parks/> (дата обращения: 16.9.2018).
21. Galliano D., Annunziato A., Fortuny-Guasch J. Gps sea level measurement device // Technical report, European Commission. 2016.

22. RTLS. LoRa Al'yans - global'ny'e seti dlya Interneta veshhej [Электронный ресурс] [2016]. URL: <http://www.rtlsnet.ru/blog/post/79> (дата обращения: 29.03.2020).
23. Розроблення стартап-проекту. Київ: НТУУ "КПІ", 2016.

Використання технології LoRa для вирішення задачі локалізації об'єктів в IoT-системах

Сорокін Д. А.

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

Київ, Україна

Анотація. Шляхом теоретичного аналізу технологій передачі даних в існуючих IoT-системах показано, що використання таких технологій, як GPS, Wi-Fi, Bluetooth не завжди є ефективним через високу вартість та малу площу покриття. Більш оптимальним рішенням для побудови мереж взаємодії між IoT-пристроями можна вважати технологію LoRa, яка одночасно дозволяє виконувати комунікацію на великій відстані, характеризується низьким енергоспоживанням та високою стійкістю до завад і є економічно привабливою. Розглянуто можливість застосування технології LoRa для вирішення задачі визначення місцезнаходження об'єктів. У якості найбільш оптимального методу геолокації обрано метод визначення різниці в часі прибуття (TDoA). Задачею подальших досліджень є створення оптимального алгоритму для рішення задачі локалізації пристроїв IoT.

Ключові слова. — Internet of Things; технологія LoRa; геолокація; Time Difference Of Arrival; мультилатерація; алгоритм локалізації.

I. Вступ

Останні 20 років ознаменувались різким ростом інтернет-технологій. Провідне місце серед них посідає Інтернет речей (Internet of Things, IoT). IoT містить мільярди взаємопов'язаних пристроїв, кількість яких збільшується кожного дня. Виробниками пропонується різноманітність приладів для забезпечення особистої безпеки, підвищення побутового комфорту або розширення комунікаційних можливостей. Однією з областей застосування технології IoT, яка досить стрімко розширюється, є відслідковування місцезнаходження об'єктів. Можна навести приклади реалізації відповідних систем: для спостереження за носорогами, щоб запобігти нападам бракон'єра [1], відстеження місцезнаходження метеостанції, що перебуває в океані [2], або контроль графіку руху громадського транспорту [3]. Для практичної реалізації технології IoT завжди необхідна відповідна телекомунікаційна інфраструктура. Найбільш поширеними технологіями для передачі даних між IoT-пристроями є GPS, Wi-Fi, Bluetooth. Однак для вирішення задачі локалізації об'єктів використання наведених технологій не завжди є ефективним. В останній час досить швидкими темпами розвивається і застосовується в IoT-системах нова телекомунікаційна технологія LoRa [4]. Метою роботи є дослідження можливості застосування даної технології для вирішення задачі локалізації об'єктів.

II. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ БЕЗДРОВОТОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ IoT ЗАСТОСУВАНЬ

Інтернет речей (Internet of Things, IoT) – це концепція мережі, що складається із взаємозв'язаних фізичних пристроїв, які мають вбудовані передавачі, а також програмне забезпечення, що дозволяє здійснювати передачу і обмін даними між фізичним світом і комп'ютерними системами за допомогою стандартних протоколів зв'язку [5].

Основними вимогами ефективної роботи IoT є низька вартість, значний радіус дії і ефективність використання енергії. Найбільш поширеними технологіями для передачі даних між IoT-пристроями є GPS, Wi-Fi, Bluetooth. GPS може бути корисною для локалізації у віддалених районах, де супутники ведуть передачу даних безпосередньо з пристроєм, що дозволяє уникнути необхідності в спеціальній інфраструктурі. Такий пристрій потребуватиме додатковий модуль для зв'язку, що збільшує вартість. Цих недоліків позбавлені технології Wi-Fi і Bluetooth, які також можна застосовувати для локалізації в певних умовах. Вони використовуються для локалізації на меншій площі, так як діапазон роботи Wi-Fi, як правило до 100 м, а Bluetooth навіть менше [6]. Тому, щоб охопити більшу область, необхідна щільна мережа точок доступу для цих технологій, що значно збільшує вартість розгортання.

Перераховані недоліки змушують відмовитись від використання систем бездротового зв'язку і локальних рішень, таких як Wi-Fi, GPS і Bluetooth, тому що вони не є представниками як малопотужних (Low Power) так і широко діючих (Wide Area) мереж (Networks) (LPWAN).



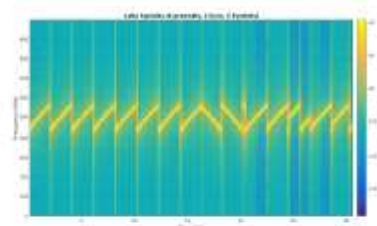


Рис. 1 Up-chirp та down-chirp в CSS модуляції

Найбільш виправданою технологією, яка одночасно дозволяє виконувати комунікацію на великій відстані і є економічно привабливою виступає LoRa, яка є представником LPWAN мереж [4].

Перевагами LoRa в порівнянні з іншими технологіями є споживана потужність, вартість і діапазон роботи. LoRa має низьке енергоспоживання, велику дальність дії, технологію бездротового зв'язку, яка є дешевою в реалізації [4]. Завдяки цим корисним властивостям LoRa набула популярності в світі IoT [7]. Тому використовувати пристрої з сигналами LoRa для локалізації є економічно доцільним рішенням.

III. ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ LoRa

При виборі методів для локалізації пристроїв IoT з точки зору точності найкращим рішенням є GPS. Для більшості сучасних глобальних систем позиціонування (Global Positioning System) модулі дозволяють визначити місцезнаходження з точністю до 10 м у відкритому зовнішньому середовищі. Деякі навіть досягають точності сантиметрового рівня [8]. Виходячи з цього, а також з широти розповсюдження GPS, це може бути досить привабливим рішенням для локалізації IoT. Проте GPS має вагомий недолік – це висока споживана потужність: використання GPS для локалізації потребує енергії більш ніж в 10 разів, в порівнянні з LoRa. При цьому пакети даних надсилаються з тією ж швидкістю. Різниця може бути навіть до 20 разів, якщо LoRa налаштована для роботи в режимі економії енергії [9]. Більш того, до модуля GPS необхідний додатковий модуль для зв'язку. Тому, було б більш раціонально використовувати мережу LPWAN як для спілкування так і для локалізації.

Перед тим, як проаналізувати алгоритми локалізації, варто розглянути саму концепцію LoRa, щоб мати загальне уявлення про її роботу.

LoRa – це бездротова модуляційна схема, реалізована на фізичному рівні (PHY), яка може бути використана для бездротового зв'язку на великій відстані. У даній роботі термін LoRa буде використовуватися для позначення технології в цілому.

З винаходом LoRa, багато компаній почали використовувати її у своїх технологіях. Оператори зв'язку у Франції, Швейцарії та Нідерландах вже розширю-

ють мережі LoRa, адаптуючи існуючу інфраструктуру. При аналізі цих мереж було визначено, що вони використовують метод локалізації під назвою TDoA [10]. Для систем локалізації пропонуються вже готові запатентовані рішення. Вони залишаються закритим вихідним кодом і можуть бути використані тільки як системи з чорним ящиком. Виникає проблема з індивідуальними рішеннями, які спрямовані на дослідження та потребують відкритих систем, задля розширення діапазону наукових пошуків.

LoRa модуляція побудована на Chirp Spread Spectrum (CSS) модуляції, що робить її більш стійкою до завад. CSS працює безперервно змінюючи частоту сигналу вгору або вниз (up-chirp або down-chirp). Це здійснюється за фіксованою величиною [11]. Ілюстрацію наведено на Рис. 1.

Перші 8 символів up-chirp – це символи преамбули, які використовуються для виявлення сигналу LoRa, наступні 2 символи down-chirp – це символи синхронізації, які використовуються для часової синхронізації, а потім 5 модульованих символів (корисне навантаження).

Ефект Доплера та багатопроменевої інтерференції може змінити частоту або синхронізацію сигналу. Оскільки швидкість передачі фіксується, існує прямий зв'язок між частотою і часом в CSS модуляції – корисна властивість, яку LoRa використовує, щоб зменшити вплив завад [11].

З метою підвищити стійкість сигналу до шумів і перешкод LoRa модуляція використовує різні методи [12]. Один із таких методів являє собою кодування символів під час модуляції LoRa. Номер біту, що використовується для кодування кожного символу один, його називають коефіцієнтом розширення SF (Spreading Factor). SF, який застосовується пристроєм LoRa, може бути будь-яким дискретним числом від 7 до 12. Більш високий SF робить сигнал стійким до шуму, що підвищує точність локалізації [12]. Це робить SF важливим параметром, який необхідно враховувати при розробці алгоритму локалізації.

При використанні SF 12, LoRa може досягти діапазону до 30 км на відкритих територіях. Може скластися враження, що завжди слід використовувати SF рівний 12. Проте, SF 12 має найнижчу швидкість передачі даних. Зменшення швидкості передачі даних означає, що пристрою потрібно буде знаходитися на відкритому просторі протягом більш тривалого часу, щоб передати таку ж кількість інформації. Це створює перешкоди для інших пристроїв, що використовують відповідну частоту, а також збільшує об'єм непотрібного трафіку для мережі. З цієї причини, оператори рекомендують використовувати адаптивну швидкість передачі даних (ADR) [13]. Коли ADR ввімкнена, пристрій буде використовувати мінімально можливий SF, при якому стабільне з'єднання може бути досягнуто [14]. Це забезпечує прийом даних мінімальною кількістю шлюзів. В результаті цього ефективність процесу локалізації зменшується. Для покращення розуміння впливу осо-



ближностей взаємодії між LoRa-пристроями на можливості рішення основної задачі, що розглядається в роботі варто розглянути протокол LoRaWAN.

LoRaWAN – це розроблена LoRa Alliance специфікація, яка визначає архітектуру протоколу зв'язку і побудованих з його використанням мереж, що використовують технологію LoRa [11].

Протокол LoRaWAN реалізований на фізичному рівні. На Рис. 2 наведено типову топологію мережі, яка використовує протокол LoRaWAN [15].

На Рис. 2 представлені вузли (Node) які підтримують зв'язок з шлюзом (Gateway) по протоколу LoRaWAN. Їх процес взаємодії в мережі виглядає наступним чином. Вузол одночасно передає інформацію до всіх шлюзів. Інформація, яка завжди надходить з пакетом даних – це часова мітка, значення інтенсивності сигналу (RSSI) та відношення сигнал-шум (SNR). Дані записуються шлюзом та надсилаються до сервера (Network server).

Коли серверу необхідно передати інформацію вузлу, то повідомлення надійде у так зване вікно прийому. Це залежить від режиму роботи LoRa, яких існує три варіанти: A, B та C. Вони визначені протоколом LoRaWAN. Основним для розгляду є режим A, оскільки його покладено в основу роботи двох інших. Також він характеризується енергоефективним режимом роботи, який досягається за рахунок обмеженої передачі даних. Вузол відкриває вікно для прийому даних лише після надсилання пакету серверу. Після отримання відповіді від серверу вікно закривається і для відправлення наступного повідомлення в вузол необхідно дочекатись, поки вузол надішле дані.

IV. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЛОКАЛІЗАЦІЇ

Розглянемо особливості основних методів локалізації з урахуванням специфіки роботи мережі LoRaWAN. Це дозволить обрати оптимальні методи для ефективного визначення місцезнаходження.

Для того, щоб визначити місцезнаходження пристрою, спочатку потрібні кілька точок відліку місцезнаходження – їх називають точки прив'язки. Існує три відомі методи для визначення місцезнаходження: методи триангуляції, трилатерації і мультилатерації [16].

В триангуляції, місце розташування пристрою може бути оцінене з використанням геометрії трикутника, який утворений між двома опорними точками і пристроєм [1]. Геометрія трикутника може бути обчислена з використанням кута надходження сигналу (AOA) від точок прив'язки до пристрою, або навпаки. В нашому випадку передавачі або пристрій можуть знаходитися на великій відстані один від одного, бо така специфіка LoRa. Через це різко збільшується похибка визначення місцезнаходження.

Метод трилатерації вже використовувався в дослідженнях по локалізації для пристроїв LoRa. Відстань від пристрою може бути оцінена двома способами: за допомогою вимірювань часу прибуття ToA (Time of arrival), або в межах RSSI (Received Signal Strength Indication) шляхом визначення потужності сигналу, що надійшов до приймача [17].

У способі ToA, основними даними для обробки слугує час, за який сигнал надходить від пристрою до станції. Через це виникає необхідність у синхронізації пристроїв та наявності точних годинників. Синхронізація потребує збільшення енергоспоживання та об'єму трафіку, що не узгоджується з довготривалою роботою від акумуляторних джерел живлення. Тому ToA не розглядатиметься далі як метод локалізації. Проте варто звернути увагу на використання RSSI для трилатерації в мережах LoRa.

A. RSSI Ранжування

Основний принцип, що застосовується в способі RSSI для ранжирування, є використання потужності сигналу, яка втрачається між передатчиком та приймачем. Потужність сигналу, яка втрачається через середовище передачі відома як втрата на трасі [10]. Втрату на трасі можна визначити за так званим бюджетом посилки. Він розраховується як підсумок всіх отриманих та втрачених сигналів, які надійшли від передавача до приймача через усі середовища передачі. Це можна описати простим рівнянням [11]:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Rx} + G_{Tx} - L_{PL}, \quad (1)$$

де P_{Rx} – це потужність сигналу в приймачі в дБ (відповідає RSSI), P_{Tx} – потужність сигналу в передавачі, G_{Rx} і G_{Tx} – коефіцієнти посилення антен, які використовуються приймачем і передавачем відповідно, L_{PL} – складова, яка враховуватиме втрати сигналу.

Після визначення RSSI з використанням виразу (1), для подальшого розрахунку відстані до джерела сигналу необхідно встановити зв'язок між втратами та відстанню на трасі. Теоретично, бездротовий сигнал використовує вільний простір, як середовище передачі. Втрати в трасі передачі зростають пропорційно квадрату відстані, яку він проходить від точки передачі. Насправді, це не завжди так, оскільки є багато джерел електромагнітних полів, особливо в міських районах, які впливають на несучий сигнал [10]. В цьому випадку більш доречно оцінювати відстань за формулою логарифмічної відстані втрат на трасі [18]:

$$L_{PL}(d) = L_{PL}(d_0) + 10 \cdot \gamma \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma, \quad (2)$$

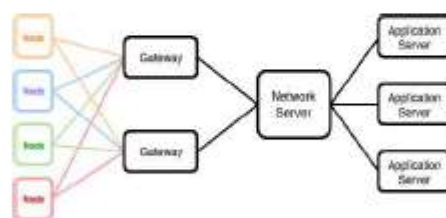


Рис. 2 Топологія мережі LoRaWAN



де $L_{PL}(d)$ – являє собою втрати на трасі в дБ на відстані d , $L_{PL}(d_0)$ – втрати в тракті передачі на опорній відстані d_0 де ще не спостерігається вплив навколишнього середовища, Y є показником втрат на трасі і X_G – це втрата від згущення тіні з нульовим середнім гауссовим розподілом і еталоном відхилення від σ [19].

На Рис. 3 наведено зв'язок між середовищем передачі, та втратами сигналу [15]. З аналізу можна зробити висновок, що основні втрати відбуваються в середовищі передачі. Саме коефіцієнт Y визначає інтенсивність цих втрат. Наприклад, для міста Оулу у Фінляндії значення $Y = 2,32$, а для міста Дортмунд в Німеччині $Y = 2,65$. Такі відмінності обумовлені зовнішніми [19] факторами та індивідуальними особливостями міського середовища. Відповідно до цього ми не можемо використовувати однакові значення для Y . Для кожного середовища необхідно проводити власні вимірювання для визначення значень цих параметрів.

Як правило, при практичному застосуванні систем локалізації об'єктів на пристроях LoRa з використанням RSSI, вони або використовували невелику площу, або працювали на відкритій місцевості з мінімальними завадами [20].

Як уже згадувалося, є третій поширений метод локалізації, який називається мультilaterація [1]. Цей метод не вимагає визначення відстані від пристрою до кожної точки прив'язки, а скоріше, тільки відмінність в відстані між точками прив'язки та пристроєм. Різницю у відстанях можна розрахувати як різницю в часі прибуття TDoA (Time Difference Of Arrival) сигналу від пристрою до контрольних точок або навпаки.

В. TDoA

TDoA є популярним методом для локалізації, оскільки він не вимагає синхронізації передавача з приймачами, а потребує тільки відмінності між відмітками часу передачі. Такі мітки часу визначаються на кожному шлюзі при прийомі-передачі. Оскільки TDoA не вимагає безпосередньої інформації про час від пристрою, синхронізованими між собою мають бути лише приймачі.

Будемо вважати, що, коли сигнал LoRa передається від пристрою, він буде отриманий N шлюзами. Ці шлюзи будуть нашими опорними точками, тому що нам відомо їх розташування. Оскільки вони різновіддалені від пристрою, то приймають передачу від LoRa в різні моменти часу.

Теоретично, використовуючи відмінності у часових інтервалах від усіх можливих пар шлюзів, ми можемо обчислити положення передавача, якщо сигнал був отриманий, щонайменше, трьома шлюзами. Цю відстань можна обчислити за формулою [11]:

$$\Delta d_{i,j} = C * \Delta t_{i,j}, \quad (3)$$

де C – швидкість світла в повітрі; i та j – відповідні LoRa шлюзи.

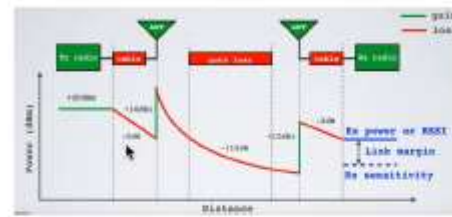


Рис. 3 Втрати сигналу в лінії передачі

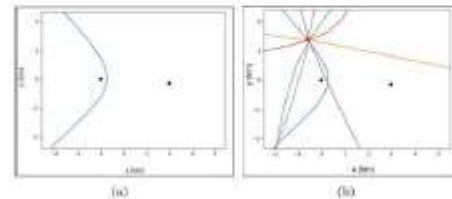


Рис. 4 Визначення місцезнаходження у методі TDoA

Використовуючи вимірювання TDoA, ми можемо створити гіперболу, що складається з усіх можливих точок, де пристрій може знаходитися (рис. 4) [20].

На Рис. 4 (а) чорні точки представляють LoRa шлюзи, а червона точка є пристрій в глобальній системі координат. З правого боку відображено результат вимірювання TDoA з інших пар шлюзів. Вони генерують більше гіпербол. Як ми можемо бачити на Рис. 4 (б), існує єдина точка, де всі гіперболи перетинаються одна з одною та вказують на фактичне місцезнаходження пристрою. Цей приклад TDoA описує ідеальну ситуацію, але в дійсності виникає помилка від невизначеності вимірювань TDoA [21].

Враховуючи розглянуті вище особливості методів визначення місцезнаходження об'єктів, для IoT – систем, побудованих з використанням технології LoRa, найбільш оптимальним методом локалізації, можна вважати метод визначення різниці в часі прибуття (TDoA), який дозволяє визначити місцезнаходження лише за рахунок зв'язку з передавачем, без необхідності використовувати додаткові системи.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз показує, що задачу локалізації об'єктів можна вирішити, спираючись на сучасні алгоритми бездротової локалізації з використанням технології LoRa, яка дозволяє виконувати комунікацію на великій відстані, характеризується низьким енергоспоживанням та високою стійкістю до завад. Найбільш оптимальним методом локалізації в таких IoT – системах, можна вважати метод визначення різниці в часі прибуття (TDoA), який дозволяє визначити місцезнаходження лише за рахунок зв'язку з передавачем, що позбавляє необхідності в забезпеченні синхронізації кінцевих пристроїв мережі, обмежуючись проведенням цієї апаратно- та енерговитратної процедури лише для LoRa-шлюзів. Оскільки ж кількість останніх може бути меншою від кількості



кінцевих пристроїв IoT на декілька порядків, то ефективність такого рішення не викликає сумнівів.

Актуальним є питання створення відкритих систем для позиціонування, а саме розробка програмних, апаратних, алгоритмічних рішень, які є відкритими для загального використання та знаходяться у вільному доступі. Для того, щоб узагальнити рішення задачі локалізації для пристроїв IoT, буде корисно створити алгоритм, що не потребує інформації від додаткових датчиків таких, як наприклад, акселерометр, оскільки такі датчики вимагають додаткового споживання енергії. Окрім цього, краще не використовувати спільну синхронізацію пристрою з приймачами, бо необхідність регулярного обміну даними збільшує затрати енергії. Вирішення цього питання є предметом подальших досліджень.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] A. S. Dudnik, "METODI VIZNACHENNYA VIDSTANI MIZH EZASOBAMI SENSORNIH MEREZH," *Matematicheskaya i kompiyuternaya modelirovaniya. Seriya: Tekhnicheskaya nauka*, pp. 40-49, 2018.
- [2] "Shadow view and internet of life continue as smart parks," 2018. [Online]. Available: <https://www.smartparks.org/news/shadowview-and-internet-of-life-continue-as-smart-parks/>. [Accessed 16 9 2018].
- [3] D. Galliano, A. Annunziato and J. Fortuny-Gansch, "GPS Sea Level Measurement Device," in *Technical report, European Commission*, 2016. DOI: [10.2788/417614](https://doi.org/10.2788/417614).
- [4] RTLS, "LoRa Al'ians - global'nyy seti dlya Interneta vesh'ey," 26 2 2016. [Online]. Available: <http://www.rtlsnet.ru/blog/post/79>. [Accessed 29 03 2020].
- [5] M. Kais, E. Bajic, F. Chaxel and F. Meyer, "A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment," *ICT Express*, vol. 5, iss. 1, pp. 1-7, 2018. DOI: [10.1016/j.icte.2017.12.003](https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.003).
- [6] G. Reiter, "Wireless connectivity for the internet of things," 2014.
- [7] R. Sharan Sinha, W. Yiqiao and H. Seung-Hoon, "A survey on lpwa technology: Lora and nb-iot," *ict Express*, pp. 14-21, iss.1 vol. 3 2017. DOI: [10.1016/j.icte.2017.03.004](https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.03.004).
- [8] G. Xu and Y. Xu, "GPS: theory, algorithms and applications," Springer, 2016. ISBN 978-3-540-72715-6 DOI: [10.1007/978-3-540-72715-6](https://doi.org/10.1007/978-3-540-72715-6).
- [9] Semtech, *Low Energy Consumption Design*, Camarillo, 2013.
- [10] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zucchi and M. Zorzi, "Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the iot and smart city scenarios," *IEEE Wireless Communications*, pp. 60-67, vol. 23, iss. 5, 2016. DOI: [10.1109/MWC.2016.7721743](https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7721743).
- [11] Semtech, *AN1200.22 LoRa Modulation Basics*, Camarillo, 2015.
- [12] M. Knight and B. Seebor, "ecoding LoRa: Realizing a Modern LPWAN with SDR," in *Proceedings of the GNU Radio Conference*, vol. 1, 2016. URL: <https://pubs.gnuradio.org/index.php/grcon/article/view/87>.
- [13] L. Nordin, "Spreading factor (sf), time on air and (adaptive) data rate," 2018. [Online]. Available: <https://wiki.lora-alliance.org/lorawan-forum-16/spreading-factor-sf-time-on-air-and-adaptive-data-rate-10908>. [Accessed 9 9 2018].
- [14] A. Rahmadhani and F. Kuipers, *When lorawan frames collide*, 2018.
- [15] C. B. Martin, U. Roedig, T. Voigt and M. A. Juan, "Do lora low-power wide-area networks scale?," *Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, p. 59, 2016.
- [16] Eric B., "LoRa," 2018. [Online]. Available: <https://lora.readthedocs.io/en/latest/>. [Accessed 29 03 2020].
- [17] F. Gustafsson and F. Gunnarsson, "Positioning using time-difference of arrival measurements. In (6), pages 553-556. Citeseer, 2003," *ICASSP*, p. 553, 2003. DOI: [10.1109/ICASSP.2003.1201741](https://doi.org/10.1109/ICASSP.2003.1201741).
- [18] J. Petajajarvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hanninen and M. Pettissalo, "On the coverage of lpwans: range evaluation and channel," *ITS Telecommunications*, pp. 55-59, 2015. DOI: [10.1109/ITST.2015.7377400](https://doi.org/10.1109/ITST.2015.7377400).
- [19] K.-H. Lam, C.-C. Cheung and W.-C. Lee, "Lora-based localization systems for noisy outdoor environment," *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, pp. 278-284, 2017. DOI: [10.1109/WIMOB.2017.8115843](https://doi.org/10.1109/WIMOB.2017.8115843).
- [20] M. Rouse, "Internet of things," 2 2020. [Online]. Available: <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/Internet-of-Things-IoT>. [Accessed 10 03 2020].
- [21] T. D. Van, "Protecting wildlife with lorawan. The Things Conference 2018," 2018. [Online]. Available: <https://www.ijms.eu/the-things-conference-on-tour-maribor-hosted-more-than-150-participants-exploring-the-future-of-iot>.



Using LoRa Technology to Solve the Problem of Object Localization on IoT Systems

D. A. Sorokin

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Kyiv, Ukraine

Abstract—Internet of Things (IoT) is a leading place in the rapidly expanding Internet technologies. One of the uses of IoT technology is to track and control the location of objects. The purpose of this work is to investigate the feasibility of using LoRa technology to solve the object localization problem.

The theoretical analysis of data technologies in existing IoT systems shows that the use of technologies such as GPS, Wi-Fi, Bluetooth is not always effective due to its high cost and low coverage. A better solution for building networks of interaction between IoT devices can be considered LoRa technology, which at the same time allows you to communicate over long distances, characterized by low power consumption and high resistance to interference and is economically attractive. LoRa is a wireless modulation scheme built on Chirp Spread Spectrum (CSS) modulation that makes it more interfering. It is based on LoRaWAN, which allows you to create a network for interaction between devices. Such a network can be used to solve the problem of geolocation.

To determine the location of a device, you first need several reference points, the location of which is already known. There are three known methods for locating: triangulation, trilateration, and multilateration methods. Let us analyze the effectiveness of using these methods when applying LoRa.

In triangulation, the location of the device can be estimated using the geometry of the triangle formed between the two reference points and the device. In our case, the transmitters or device will be at a great distance from each other, because this is LoRa specificity. Because of this, location error is increased.

The trilateration method has already been used in localization studies for LoRa devices. The distance from the device can be estimated in two ways: by measuring the time of arrival (ToA), or within RSSI by determining the signal strength of the received signal to the receiver.

In the ToA method, the master data for processing is the time at which the signal arrives from the device to the station. This method is characterized by high power consumption due to the need for synchronization between devices. In addition, the quality of the location is highly dependent on the environment.

This method of localization, such as multilateration, does not require the determination of the distance from the device to each anchor point, more important is the difference in the distance between the anchor points themselves. TDoA is a popular method for localization because it does not require transmitter synchronization with receivers. Therefore, the most optimal method of localization can be considered the method of determining the difference in time of arrival (TDoA).

The analysis shows that the object localization problem can be solved by using modern wireless localization algorithms using LoRa technology. The goal of further research is to create an optimal algorithm for solving the problem of localization of IoT devices.

Keywords — Internet of Things; LoRa technology; geolocation; Time Difference Of Arrival; multilateration; localization algorithm.



ДОДАТОК Б. Акт впровадження

Товариство з обмеженою
відповідальністю
«РАДІОНІКС»
Харківське шосе, 152, кв. 399
м.Київ, 02091, Україна
тел./факс: +38(044)495-52-09
E-mail: radionix93@gmail.com
Код ЄДРПОУ 33936538



Limited liability
company
«RADIONIX»
152 Kharkivske highway, apt. 399
Kyiv, 02091, Ukraine
tel./fax: +38(044)495-52-09
E-mail: radionix93@gmail.com
www.radionix.com.ua

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ТОВ «Радіонікс»



С.Б. Зав'ялов
(ініціали, прізвище)

«10» грудня 2020 р.

А К Т

впровадження результатів дипломного проекту

виконаного студентом групи ДК-91мп

кафедри КЕОА ФЕЛ КПІ ім. І.Сікорського

Сорокіна Дмитра Анатолійовича

на тему «Методи визначення координат об'єктів з використанням
технології LoRa»

Даний акт складено про те, що результати дипломного проекту «Система позиціонування LoRa» студента групи ДК-91мп кафедри КЕОА ФЕЛ КПІ ім. Ігоря Сікорського Сорокіна Дмитра Анатолійовича будуть використанні при розробці виробів ТОВ «Радіонікс» (для дистанційного зондування землі з безпілотного апарату).

Начальник сектору

В. Ю. Танигін
(ініціали, прізвище)